

Untersuchungen zum Einfluss rechteckiger z-Pins auf die  
mechanischen Eigenschaften heißaushärtender faserverstärkter  
Kunststoffe unter quasi-statischer und schwingender Belastung

**Dissertation**

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
der Universität Rostock

**vorgelegt von**

Julian Hoffmann, geb. am 24.05.1987 in Schleswig

aus Rostock

Rostock, 2018

**Gutachter:**

**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Scharr**

Universität Rostock  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik / Leichtbau

**Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Woernle**

Universität Rostock  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Lehrstuhl für Technische Mechanik / Dynamik

**Datum der Einreichung:**

06. November 2018

**Datum der Verteidigung:**

09. Juli 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung in das Thema . . . . .	1
1.2	Problem- und Zielstellung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik</b>	<b>6</b>
2.1	Translaminare Verstärkung von Faserverbundwerkstoffen . . . . .	7
2.2	Herstellung von z-Pin-verstärkten Laminaten . . . . .	8
2.3	Wirkmechanismen der z-Pin-Verstärkung . . . . .	10
2.4	Mikrostruktur z-Pin-verstärkter Faserverbundwerkstoffe . . . . .	12
2.4.1	Faserumlenkungen und -brüche . . . . .	12
2.4.2	Harzreiche Zonen . . . . .	15
2.4.3	Inklinationswinkel . . . . .	16
2.4.4	Pin-Laminat-Grenzfläche . . . . .	18
2.4.5	Reduzierung des Faservolumengehalts . . . . .	19
2.5	Mechanische Eigenschaften von z-Pin-verstärkten Faserverbundwerkstoffen	20
2.5.1	Pullout-Eigenschaften . . . . .	20
2.5.2	Bruchmechanische Eigenschaften . . . . .	22
2.5.3	Impact- und Schadenstoleranzverhalten . . . . .	25
2.5.4	Zugsteifigkeit und -festigkeit . . . . .	26
2.5.5	Drucksteifigkeit und -festigkeit . . . . .	29
2.6	Numerische Untersuchungen an z-Pin-verstärkten Faserverbundwerkstoffen	32
2.6.1	Einheitszellenmodelle . . . . .	33
2.6.2	Kohäsivelemente . . . . .	34
2.7	Anwendungsbeispiele für z-Pin-Verstärkungen . . . . .	36

---

<b>3</b>	<b>Verwendete Materialien und Untersuchungsmethoden</b>	<b>37</b>
3.1	Charakterisierung der verwendeten Materialien . . . . .	37
3.1.1	Prepreghalbzeug . . . . .	37
3.1.2	z-Pins . . . . .	38
3.2	Prüfkörperherstellung . . . . .	40
3.3	Untersuchung der Mikrostruktur . . . . .	42
3.4	Numerische Untersuchung des Ablöseverhaltens . . . . .	44
3.5	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	48
3.5.1	Pullout-Eigenschaften . . . . .	48
3.5.2	Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-I-Beanspruchung . . .	51
3.5.3	Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-II-Beanspruchung . .	55
3.5.4	Zugsteifigkeit und -festigkeit . . . . .	58
3.5.5	Drucksteifigkeit und -festigkeit . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Ergebnisdarstellung und -auswertung</b>	<b>64</b>
4.1	Mikrostruktur . . . . .	64
4.1.1	Faserwelligkeit . . . . .	64
4.1.2	Inklination . . . . .	67
4.1.3	Pin-Laminat-Grenzfläche . . . . .	70
4.1.4	Orientierung rechteckiger z-Pins im Laminat . . . . .	73
4.2	Numerische Untersuchungen des Ablöseverhaltens . . . . .	74
4.3	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	79
4.3.1	Pullout-Eigenschaften . . . . .	79
4.3.2	Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-I-Beanspruchung . . .	84
4.3.3	Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-II-Beanspruchung . .	93
4.3.4	Zugsteifigkeit und -festigkeit . . . . .	99
4.3.5	Drucksteifigkeit und -festigkeit . . . . .	107
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>114</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>119</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der Kontaktzonenbereiche zwischen Pin und Laminat für rechteckige und kreisrunde z-Pins . . . . .	3
2.1	Überblick über die weltweit aktivsten Forschungseinrichtungen im Bereich der z-Pin-Verstärkung . . . . .	6
2.2	Schematische Darstellung des (a) Verwebens, (b) Verstrickens und (c) Verflechtens von trockenen Faserhalbzeugen . . . . .	7
2.3	Schematische Darstellung des (a) Vernähens und des (b) z-Anchoring von trockenen Faserhalbzeugen . . . . .	8
2.4	Kommerziell erhältliche Pin-Preform mit kreisrunden z-Pins . . . . .	9
2.5	Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses z-Pin-verstärkter Lamine im UAZ-Verfahren . . . . .	9
2.6	Schematische Darstellung der drei grundlegenden Rissbeanspruchungsarten der Bruchmechanik . . . . .	10
2.7	Ausbildung einer z-Pin-Brückenzone unter Mode-I-Beanspruchung . . . . .	11
2.8	Ausbildung einer z-Pin-Brückenzone unter Mode-II-Beanspruchung . . . . .	11
2.9	Schematische Darstellung der Faserwelligkeit um einen kreisrunden z-Pin . . . . .	13
2.10	Darstellung des (a) Faserwelligkeitswinkels in z-Pin-verstärkten Laminaten in Abhängigkeit vom Pindurchmesser und des (b) Anteils umgelenkter Fasern in Abhängigkeit vom Pingealt . . . . .	13
2.11	Schematische Darstellung (a) symmetrischer und (b) asymmetrischer Faserwelligkeit in einer UD-Schicht . . . . .	14
2.12	Fasereinzug in z-Richtung an einem kreisrunden z-Pin . . . . .	15
2.13	Darstellung einer (a) harzreichen Zone in einem z-Pin-verstärkten Laminat und (b) Definition der harzreichen und faserreichen Richtung in einer UD-Schicht . . . . .	16
2.14	Verteilung der Inklinationswinkel in einem UD-Laminat für kreisrunde z-Pins mit einem Durchmesser von 0,51 mm . . . . .	17

---

2.15	Inklinationswinkel kreisrunder z-Pins mit einem Pindurchmesser von 0,51 mm in unidirektionalen Laminaten während unterschiedlicher Phasen des Herstellungsprozesses . . . . .	17
2.16	REM-Aufnahmen von Grenzflächenrissen zwischen Pin und Laminat im (a) Quer- und (b) Längsschnitt durch einen kreisrunden z-Pin . . . . .	18
2.17	Vereinfachte Darstellung eines typischen im Pullout-Versuch ermittelten tri-linearen Brückenkraftverlaufs . . . . .	21
2.18	Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-I- und Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit vom Pinge halt . . . . .	23
2.19	Rissfortschrittskurven unverpinnter und z-Pin-verstärkter unidirektionaler Prüfkörper unter Mode-I-Beanspruchung in Abhängigkeit vom (a) Pinge halt ( $\varnothing$ 0,28 mm) und (b) Pindurchmesser für kreisrunde z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm (thin) bzw. 0,51 mm (thick) . . . . .	24
2.20	Rissfortschrittskurven unverpinnter und z-Pin-verstärkter unidirektionaler Prüfkörper unter Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit vom (a) Pinge halt ( $\varnothing$ 0,28 mm) und (b) Pindurchmesser für kreisrunde z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm (thin) bzw. 0,51 mm (thick) . . . . .	25
2.21	Einfluss von (a) Pinge halt ( $\varnothing$ 0,28 mm) und (b) Durchmesser kreisrunder z-Pins (2,0 %) auf die Zugsteifigkeit von CFK-Laminaten . . . . .	27
2.22	Einfluss von (a) Pinge halt ( $\varnothing$ 0,28 mm) und (b) Durchmesser kreisrunder z-Pins (2,0 %) auf die Zugfestigkeit von CFK-Laminaten . . . . .	28
2.23	Lebensdauerkurven (a) unidirektionaler und (b) quasi-isotroper Lamine unter schwingender Zugbeanspruchung in Abhängigkeit vom Volumengehalt kreisrunder z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm . . . . .	29
2.24	Einfluss von (a) Pinge halt ( $\varnothing$ 0,28 mm) und (b) Pindurchmesser auf die Drucksteifigkeit von unidirektionalen CFK-Laminaten . . . . .	29
2.25	Einfluss von (a) Pinge halt ( $\varnothing$ 0,28 mm) und (b) Pindurchmesser auf die Druckfestigkeit von unidirektionalen CFK-Laminaten . . . . .	30
2.26	Degradation der (a) Drucksteifigkeit und (b) -festigkeit z-Pin-verstärkter Lamine mit unterschiedlichem Laminataufbau, ermittelt für kreisrunde z-Pins ( $\varnothing$ 0,51 mm) mit einem Pinge halt von 2,0 % . . . . .	31
2.27	Lebensdauerkurven unidirektionaler Lamine unter schwingender Druckbeanspruchung in Abhängigkeit vom (a) Pinge halt ( $\varnothing$ 0,28 mm) und (b) Pindurchmesser (thin: $\varnothing$ 0,28 mm bzw. thick: $\varnothing$ 0,51 mm) . . . . .	31
2.28	Schematische Darstellung von Einheitszellenmodellen z-Pin-verstärkter Lamine mit (a) unidirektionalem, (b) bidirektionalem und (c) quasi-isotropem Lagenaufbau . . . . .	33

---

---

2.29	Darstellung eines typischen sternenförmigen FE-Netzes zur Vernetzung von Einheitszellenmodellen mit unterschiedlichen Faserorientierungen . . . . .	34
2.30	Darstellung eines typischen bi-linearen Kohäsivgesetzes . . . . .	35
3.1	Aushärtezyklus für das verwendete Prepregsystem laut Datenblatt . . . . .	38
3.2	Aufnahme der verwendeten kreisrunden und rechteckigen z-Pins . . . . .	39
3.3	Darstellung der Vorrichtung zur Herstellung der Prüfkörperlamine . . . . .	41
3.4	Schematische Darstellung des diskreten Verteilungsfeldes zur Berücksichtigung der Faserwelligkeit in der numerischen Untersuchung . . . . .	45
3.5	Darstellung des verwendeten Finite-Elemente-Netzes der Einheitszellenmodelle mit (a) rechteckigen und (b) kreisrunden z-Pins . . . . .	46
3.6	Schematische Darstellung der verwendeten Pullout-Prüfkörper . . . . .	49
3.7	Graphische Darstellung der Anteile der elastischen Deformationsarbeit $W_{el}$ und der Reibungsarbeit $W_f$ an der während des Pulloutversuchs dissipierten Gesamtenergie . . . . .	51
3.8	Schematische Darstellung der verwendeten DCB-Prüfkörper . . . . .	52
3.9	Charakteristische Rissfortschrittskurve unter schwingender Rissöffnungsbeanspruchung . . . . .	55
3.10	Schematische Darstellung der verwendeten ENF-Prüfkörper . . . . .	56
3.11	Schematische Darstellung der Anriss erzeugung für die Untersuchungen unter schwingender Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung. 1): Versuchsaufbau zur Anriss erzeugung. 2): Quasi-statische Beanspruchung bis zum Einsetzen des Risswachstums. 3): Versuchsaufbau für die Versuche unter schwingender Mode-II-Beanspruchung . . . . .	57
3.12	Schematische Darstellung der verwendeten Prüfkörper zur Bestimmung der Zugeigenschaften . . . . .	58
3.13	Schematische Darstellung der verwendeten Prüfkörper zur Bestimmung der Druckeigenschaften . . . . .	61
4.1	Faserumlenkungen an einem (a) kreisrunden, (b) längs ausgerichteten rechteckigen und (c) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pin in einem UD-Laminat . . . . .	65
4.2	Faserumlenkungen in quasi-isotropen Laminaten an einem (a) kreisrunden z-Pin sowie an rechteckigen z-Pins in einer (b) 0°, (c) 45°- und (d) 90°-Faserlage . . . . .	66
4.3	Abhängigkeit der Faserwelligkeitwinkel von der Störbreite der verwendeten z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten . . . . .	67
4.4	Darstellung der Inklination anhand eines (a) kreisrunden und (b) rechteckigen z-Pins in einem quasi-isotropen Laminat . . . . .	68

---

---

4.5	Inklinationswinkelverteilung kreisrunder und rechteckiger z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten . . . . .	68
4.6	Inklinationswinkelverteilung längs und quer ausgerichteter rechteckiger z-Pins in unidirektionalen Laminaten . . . . .	69
4.7	Charakteristische Grenzflächenschädigungen a) kreisrunder, b) längs ausgerichteter rechteckiger und c) quer ausgerichteter rechteckiger z-Pins in unidirektionalen Laminaten. Grenzflächenrisse sind gelb markiert. . . . .	71
4.8	Charakteristische Grenzflächenschädigungen zwischen quasi-isotropen Laminaten und (a) kreisrunden z-Pins sowie rechteckigen z-Pins in einer (b) 0°-, (c) 45°- und (d) 90°-Faserlage. Grenzflächenrisse sind gelb markiert. . .	72
4.9	Überblick über die Drehung einiger nominell quer in den Werkstoff eingebrachter rechteckiger z-Pins in einem UD-Laminat . . . . .	73
4.10	Numerisch ermittelte Grenzflächenspannungen zwischen (a) kreisrunden, (b) längs ausgerichteten rechteckigen sowie (c) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins und unidirektionalen Laminaten . . . . .	74
4.11	Numerisch ermittelte Grenzflächenspannungen zwischen (a) kreisrunden sowie (b) rechteckigen z-Pins und quasi-isotropen Laminaten . . . . .	74
4.12	Numerisch ermittelter Grenzflächenzustand an kreisrunden z-Pins in (a) unidirektionalen und (b) quasi-isotropen Laminaten. Vollständig versagte Grenzflächenelemente sind in grau dargestellt. . . . .	76
4.13	Numerisch ermittelter Grenzflächenzustand an (a) längs ausgerichteten und (b) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins in unidirektionalen Laminaten sowie (c) rechteckigen z-Pins in quasi-isotropen Laminaten. Vollständig versagte Grenzflächenelemente sind in grau dargestellt. . . . .	77
4.14	Numerisch ermittelter Grenzflächenzustand an (a) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins in unidirektionalen und (b) rechteckigen z-Pins in quasi-isotropen Laminaten. Vollständig versagte Grenzflächenelemente sind in grau dargestellt. . . . .	78
4.15	Charakteristische Brückenkraftkurven kreisrunder und rechteckiger z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten . . . . .	79
4.16	Durchschnittliche Brückenkräfte pro Pin für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten . . . . .	80
4.17	Schubspannungen in der Pin-Laminat-Grenzfläche zum Zeitpunkt der Pinablösung ( $\tau_d$ ) sowie bei Erreichen der maximalen Reibkraft ( $\tau_f$ ) für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern . . . . .	81
4.18	Schematische Darstellung des Snubbing-Effekts . . . . .	82

---

---

4.19	Darstellung der während des Pulloutversuchs dissipierten Energie pro Pin für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern . . . . .	83
4.20	Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-I-Beanspruchung . . . . .	84
4.21	Brückenzone innerhalb eines z-Pin-verstärkten DCB-Prüfkörpers in der (a) sich entwickelnden und (b) vollständig ausgebildeten Phase . . . . .	85
4.22	Charakteristische Risswiderstandskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-I-Beanspruchung . . . . .	86
4.23	Abhängigkeit der kritischen Energiefreisetzungsrates von der Pingeometrie für unidirektionale und quasi-isotrope Lamine unter Mode-I-Beanspruchung	87
4.24	Abhängigkeit der kritischen Energiefreisetzungsrates vom Pingegehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten unter Mode-I-Beanspruchung . . . . .	88
4.25	Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Mode-I-Beanspruchung in Abhängigkeit vom Pingegehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins . . . . .	89
4.26	Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Mode-I-Beanspruchung in Abhängigkeit von der Pingeometrie . . . . .	91
4.27	Beim DCB-Versuch entstehende Löcher (a) rechteckiger z-Pins unter quasi-statischer und (b) schwingender Beanspruchung sowie (c) kreisrunder z-Pins unter quasi-statischer und (d) schwingender Beanspruchung . . . . .	92
4.28	Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-II-Beanspruchung . . . . .	93
4.29	Abhängigkeit der Risswiderstandskurven quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-II-Beanspruchung vom (a) Pingegehalt und (b) der Pingeometrie . . . . .	94
4.30	Charakteristisches Versagensbild der getesteten z-Pin-Verstärkung unter Mode-II-Beanspruchung . . . . .	96
4.31	Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit vom Pingegehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins . . . . .	97
4.32	Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit von der Pingeometrie . . . . .	98
4.33	Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Zugbeanspruchung . . . . .	99
4.34	Abhängigkeit der Zugsteifigkeit von der Pingeometrie für unidirektionale und quasi-isotrope Lamine . . . . .	100

---

---

4.35	Abhängigkeit der Zugsteifigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine vom Pingealt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins . . . . .	101
4.36	Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Pingeometrie für unidirektionale und quasi-isotrope Lamine . . . . .	102
4.37	Abhängigkeit der Zugfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine vom Pingealt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins . . . . .	104
4.38	Versagen unidirektionaler Lamine (a) ohne z-Pin-Verstärkung und (b) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins sowie quasi-isotroper Lamine (c) ohne z-Pin-Verstärkung und (d) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins unter quasi-statischer Zugbelastung . . . . .	105
4.39	Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Zugbelastung in Abhängigkeit von der Pingeometrie . . . . .	106
4.40	Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Zugbelastung in Abhängigkeit vom Pingealt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins . . . . .	107
4.41	Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Druckbelastung . . . . .	108
4.42	Abhängigkeit der Druckfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine von der Pingeometrie . . . . .	110
4.43	Abhängigkeit der Druckfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine vom Pingealt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins . . . . .	111
4.44	Versagen unidirektionaler Lamine (a) ohne z-Pin-Verstärkung und (b) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins sowie quasi-isotroper Lamine (c) ohne z-Pin-Verstärkung und (d) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins unter quasi-statischer Druckbelastung . . . . .	112
4.45	Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Druckbelastung in Abhängigkeit von der Pingeometrie . . . . .	113
4.46	Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Druckbelastung in Abhängigkeit vom Pingealt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins . . . . .	113

# Tabellenverzeichnis

2.1	Ergebnisse von Chang und Mouritz zur Volumenzunahme von unidirektionalen CFK-Laminaten mit z-Pin-Verstärkung . . . . .	20
3.1	Mechanische Kennwerte des eingesetzten Prepregsystems in Faserrichtung .	38
3.2	Gegenüberstellung von Nennmaß und tatsächlichen Abmessungen der verwendeten kreisrunden und rechteckigen z-Pins . . . . .	39
3.3	Verwendete Geräteeinstellungen für die ultraschallgestützte Pineinbringung	41
3.4	Im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse verwendete Materialkennwerte der z-Pins, der harzreichen Zonen und des Laminats . . . . .	46
3.5	Im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse verwendete Materialkennwerte der Kohäsivelemente . . . . .	47
3.6	Versuchsplan zur Durchführung der Pullout-Untersuchungen . . . . .	49
3.7	Versuchsplan zur Durchführung der Mode-I-Untersuchungen . . . . .	52
3.8	Versuchsplan zur Durchführung der Mode-II-Untersuchungen . . . . .	57
3.9	Versuchsplan zur Untersuchung der mechanischen Zugeigenschaften . . . .	59
3.10	Versuchsplan zur Untersuchung der mechanischen Druckeigenschaften . . .	62
4.1	Übersicht über die gegenüber den jeweiligen Referenzpins verbesserten Grenzflächeneigenschaften externer Untersuchungen (OF = Oberfläche) . . . . .	84
4.2	Versuchsergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen unter schwingender Mode-I-Rissöffnungsbeanspruchung . . . . .	90
4.3	Versuchsergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen unter quasi-statischer Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung . . . . .	95
4.4	Versuchsergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen unter schwingender Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung . . . . .	98
4.5	Einfluss kreisrunder und rechteckiger z-Pins auf die Drucksteifigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper . . . . .	109

# Abkürzungsverzeichnis

<b>2D</b>	zweidimensional
<b>3D</b>	dreidimensional
<b>BMI</b>	Bismaleimid
<b>C</b>	Kohlenstoff
<b>CFK</b>	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
<b>CNT</b>	Carbon Nano Tube
<b>DCB</b>	Double Cantilever Beam
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>ENF</b>	End Notched Flexure
<b>FE</b>	Finite Elemente
<b>FEM</b>	Finite-Elemente-Methode
<b>FKV</b>	Faser-Kunststoff-Verbund
<b>FVG</b>	Faservolumengehalt
<b>ISO</b>	Internationale Organisation für Normung
<b>OF</b>	Oberfläche
<b>PTFE</b>	Polytetrafluorethylen
<b>PMI</b>	Polymethacrylimid
<b>QI</b>	quasi-isotrop
<b>REM</b>	Rasterelektronenmikroskop
<b>UAZ</b>	Ultrasonically Assisted Z-fiber Process
<b>UD</b>	unidirektional
<b>WAK</b>	Wärmeausdehnungskoeffizient



# Formelverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
$a$	$mm$	Risslänge
$a_0$	$mm$	Länge des künstlichen Ansrisses
$da$	$mm$	Risslängenänderung
$da/dN$	$mm$	Risswachstumsgeschwindigkeit
$\Delta a$	$mm$	Risswachstumslänge
$b_s$	$mm$	Störbreite der z-Pins
$c$	—	Materialkonstante zur Beschreibung von Lebensdauerkurven
$d$	$mm$	Durchbiegung der Probe im ENF-Versuch
$d_{max}$	$mm$	Maximale Durchbiegung der Probe im ENF-Versuch
$d_{min}$	$mm$	Minimale Durchbiegung der Probe im ENF-Versuch
$d_{Pin}$	$mm$	Durchmesser kreisrunder z-Pins
$l_1$	$mm$	Vertikaler Abstand vom Mittelpunkt der Lasteinleitung zur Mittelebene der DCB-Prüfkörper
$l_2$	$mm$	Horizontaler Abstand vom Mittelpunkt der Lasteinleitung zur Kante des Krafteinleitungselements der DCB-Prüfkörper
$m$	—	Neigung der Lebensdauerkurven im Zug- und Druckversuch
$t$	$mm$	Prüfkörperdicke
$x_{FW}$	$mm$	Länge des Bereichs der Faserwelligkeit in x-Richtung
$x_o$	$mm$	Abstand eines z-Pins zur Prüfkörperkante in x-Richtung auf der Probenoberseite
$x_u$	$mm$	Abstand eines z-Pins zur Prüfkörperkante in x-Richtung auf der Probenunterseite
$y_{FW}$	$mm$	Länge des Bereichs der Faserwelligkeit in y-Richtung
$y_o$	$mm$	Abstand eines z-Pins zur Prüfkörperkante in y-Richtung auf der Probenoberseite
$y_u$	$mm$	Abstand eines z-Pins zur Prüfkörperkante in y-Richtung auf der Probenunterseite

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A_o$	$mm^2$	Querschnittsfläche kreisrunder z-Pins
$A_{\square}$	$mm^2$	Querschnittsfläche rechteckiger z-Pins
$C$	–	Materialkonstante zur Beschreibung der Risswachstumskurven
$E$	$N/mm^2$	Elastizitätsmodul
$E_D$	$N/mm^2$	Druck-Elastizitätsmodul
$E_Z$	$N/mm^2$	Zug-Elastizitätsmodul
$F$	–	Korrekturfaktor für die Benutzung von Krafteinleitungsblöcken im DCB-Versuch
$G$	$N/mm^2$	Schubmodul
$G_I$	$kJ/m^2$	Energiefreisetzungsrate unter Mode-I-Beanspruchung
$G_{IC}$	$kJ/m^2$	Kritische Energiefreisetzungsrate unter Mode-I-Beanspruchung
$\Delta G_I$	$kJ/m^2$	Beanspruchungsamplitude im DCB-Versuch
$\Delta G_{I,c}$	$kJ/m^2$	Grenzwert für instabiles Risswachstum im DCB-Versuch
$\Delta G_{I,th}$	$kJ/m^2$	Grenzwert für einsetzendes Risswachstum im DCB-Versuch
$G_{II}$	$kJ/m^2$	Energiefreisetzungsrate unter Mode-II-Beanspruchung
$G_{IIC}$	$kJ/m^2$	Kritische Energiefreisetzungsrate unter Mode-II-Beanspruchung
$\Delta G_{II}$	$kJ/m^2$	Beanspruchungsamplitude im ENF-Versuch
$\Delta G_{II,c}$	$kJ/m^2$	Grenzwert für instabiles Risswachstum im ENF-Versuch
$\Delta G_{II,th}$	$kJ/m^2$	Grenzwert für einsetzendes Risswachstum im ENF-Versuch
$G_C$	$kJ/m^2$	Kritische Energiefreisetzungsrate
$K$	$N/mm^3$	Steifigkeit der Kohäsivelemente
$K_I$	$N/mm^3$	Steifigkeit der Kohäsivelemente unter Mode-I-Beanspruchung
$K_{II}$	$N/mm^3$	Steifigkeit der Kohäsivelemente unter Mode-II-Beanspruchung
$L$	$mm$	Auflagerabstand im ENF-Versuch
$L_W$	$mm$	Wirklänge der z-Pins
$M$	–	Gradient der Rissfortschrittskurven im DCB- und ENF-Versuch
$N_K$	–	Korrekturfaktor für große Verformungen im DCB-Versuch
$P$	$N$	Im experimentellen Versuch gemessene Kraft
$P_d$	$N$	Im Pulloutversuch erzielte maximale Ablösekraft
$P_f$	$N$	Im Pulloutversuch erzielte maximale Reibkraft
$R_D$	$N/mm^2$	Druckfestigkeit
$R_Z$	$N/mm^2$	Zugfestigkeit
$S_{33}$	$N/mm^2$	Normalspannung in einem Kohäsivelement
$S_{DEG}$	–	Elementschädigung eines Kohäsivelements
$U_{Pin}$	$mm$	Umfang eines z-Pins
$dU$	$J$	Energiemenge, die bei einer Risslängenänderung um $da$ frei wird

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	$1/K$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\beta$	—	Parameter für Versagenskriterium der Kohäsivelemente
$\delta$	$mm$	Rissöffnungsverschiebung
$\delta_0$	$mm$	Rissöffnungsverschiebung bei Versagen der Kohäsivelemente
$\delta_d$	$mm$	Rissöffnungsverschiebung im Pullout-Versuch bei Erreichen der maximalen Ablösekraft
$\delta_e$	$mm$	Rissöffnungsverschiebung bei Erreichen der maximalen Beanspruchbarkeit der Kohäsivelemente
$\delta_f$	$mm$	Rissöffnungsverschiebung im Pullout-Versuch bei Erreichen der maximalen Reibkraft
$\delta_{max}$	$mm$	Maximale Rissöffnung der Probe im DCB-Versuch
$\delta_{min}$	$mm$	Minimale Rissöffnung der Probe im DCB-Versuch
$\delta_p$	$mm$	Rissöffnungsverschiebung im Pullout-Versuch nach vollständig erfolgtem Pinauszug
$\epsilon_1$	—	Prüfkörperdehnung (0,05 %)
$\epsilon_2$	—	Prüfkörperdehnung (0,25 %)
$\nu$	—	Querkontraktionszahl
$\sigma_1$	$N/mm^2$	Spannung bei $\epsilon_1 = 0,05 \%$
$\sigma_2$	$N/mm^2$	Spannung bei $\epsilon_2 = 0,25 \%$
$\sigma_I$	$N/mm^2$	Mode-I-Beanspruchung in einem Kohäsivelement
$\sigma_{I,max}$	$N/mm^2$	Mode-I-Beanspruchbarkeit von Kohäsivelementen
$\sigma_{II}$	$N/mm^2$	Mode-II-Beanspruchung in einem Kohäsivelement
$\sigma_{II,max}$	$N/mm^2$	Mode-II-Beanspruchbarkeit von Kohäsivelementen
$\sigma_{max}$	$N/mm^2$	Beanspruchbarkeit von Kohäsivelementen
$\sigma_o$	$N/mm^2$	Maximalbeanspruchung
$\sigma_u$	$N/mm^2$	Minimalbeanspruchung
$\tau_d$	$N/mm^2$	Schubspannung in der Pin-Laminat-Grenzfläche bei Erreichen der maximalen Ablösekraft im Pullout-Versuch
$\tau_f$	$N/mm^2$	Schubspannung in der Pin-Laminat-Grenzfläche bei Erreichen der maximalen Reibkraft im Pullout-Versuch
$\Delta$	$mm$	Korrekturfaktor im DCB-Versuch
$\Theta$	$^\circ$	Faserwelligkeitswinkel
$\Phi$	$^\circ$	Inklinationswinkel der z-Pins
$\Phi_x$	$^\circ$	Inklinationswinkel der z-Pins in x-Richtung
$\Phi_y$	$^\circ$	Inklinationswinkel der z-Pins in y-Richtung

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung in das Thema

Der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen ist eine bereits seit Jahrzehnten bewährte Methode durch die gezielte Substitution von klassischen metallischen Konstruktionswerkstoffen das Gewicht einzelner Bauteile oder ganzer Strukturen zu verringern. Insbesondere in den letzten Jahren konnte die Wettbewerbsfähigkeit dieser Werkstoffe, vor allem durch die Entwicklung moderner und zeiteffizienter Fertigungsverfahren mit hohem Automatisierungsgrad, noch einmal deutlich gesteigert und auf diese Weise eine Vielzahl neuer Anwendungsfelder erschlossen werden. So finden sich Bauteile aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) bereits in vielen Serienanwendungen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie wie beispielsweise dem BMW i3 oder dem Airbus A350, der mit 53 % den größten Anteil an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) aller serienmäßig hergestellten Großraumflugzeuge aufweist [1].

Traditionell werden Faserverbundwerkstoffe aus einer definierten Anzahl dünner Einzelschichten, welche die Verstärkungsfasern beinhalten, aufgebaut. Aufgrund dieser Anordnung aus schichtweise drapierten, hochfesten und –steifen Fasern sowie der formgebenden Matrix weisen FKV hervorragende gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften in der Laminebene auf. Ein bis heute weitestgehend ungelöstes Problem dieser Verbundwerkstoffe stellt jedoch ihre Anfälligkeit für die Entstehung von Delaminationen, also Ablösungen einzelner Laminatschichten voneinander, zum Beispiel infolge von interlaminaren Scherbeanspruchungen, Umwelteinflüssen oder schlagartigen Belastungen, dar. Aufgrund des Fehlens von Verstärkungsfasern in Dickenrichtung (z-Richtung) des Werkstoffs kann sich ein solcher Riss unter einem relativ geringen, hauptsächlich von den Matriceigenschaften bestimmten Widerstand im Werkstoff ausbreiten und so die Tragfähigkeit eines Bauteils stark vermindern, oder sogar zu seinem vollständigen Versagen führen.

Delaminationen, die sich im Inneren des Werkstoffs gebildet haben, sind in der Regel von außen nicht sichtbar und können oft nur mit großem technischen Aufwand, beispielsweise mithilfe von Ultraschall-, Wirbelstrom- oder thermographischen Verfahren detektiert werden. Um trotz einer potentiellen, unerkannten Schädigung im Werkstoff die notwendige Tragfähigkeit gewährleisten zu können, werden tragende FKV-Bauteile in der Regel massiv überdimensioniert [2], was in direktem Konflikt zu der ursprünglich angestrebten Gewichtsreduzierung steht. Eine Alternative zur Überdimensionierung der Bauteile kann stattdessen das Einbringen von Verstärkungsfasern in Dickenrichtung des Werkstoffs sein, um das Ausbreiten von interlaminaren Rissen zu unterdrücken und auf diese Weise die geforderte Tragfähigkeit zu gewährleisten.

Bestehende Verfahren zur Erhöhung der interlaminaren Risszähigkeit in Verbindung mit trockenen Faserhalbzeugen sind unter anderem das Vernähen oder Verweben der einzelnen Faserlagen vor ihrer Imprägnierung mit dem Matrixharz. Zur Verstärkung von vor allem in der Luftfahrtindustrie häufig eingesetzten vorimprägnierten Faserhalbzeugen, sogenannten Prepregs, kommt hingegen bevorzugt das z-Pinning Verfahren zur Anwendung [3, 4], bei dem dünne Stäbe (z-Pins) mit Durchmessern von typischerweise einigen Zehntelmillimetern in z-Richtung in den Werkstoff eingebracht werden und sich während der Aushärtung im Autoklaven an das umliegende Laminat anhaften. Durch die Verbindung der einzelnen Laminatschichten miteinander sind die z-Pins in der Lage Brückenkräfte zwischen den Flanken eines entstandenen Risses zu übertragen und so die interlaminare Risszähigkeit sowie die Schadenstoleranz von FKV-Werkstoffen effektiv zu erhöhen.

## 1.2 Problem- und Zielstellung

Das Einbringen von z-Pins in einen Faserverbundkunststoff führt zwangsläufig zu Veränderungen in der Mikrostruktur des Werkstoffs. Vor allem dabei entstehende Auslenkungen der Fasern aus ihrer ursprünglichen Lage, aber auch vereinzelt auftretende Faserbrüche bewirken eine spürbare Abnahme der mechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter FKV in der Laminebene (in-plane). Der Steigerung der bruchmechanischen Eigenschaften steht daher immer auch eine Abnahme der mechanischen in-plane-Eigenschaften gegenüber. Die Beeinflussung der Mikrostruktur verstärkt sich mit steigender Anzahl in den Werkstoff eingebrachter z-Pins sowie mit zunehmendem Durchmesser [5, 6]. Da eine Erhöhung des Pindurchmessers bzw. der Anzahl eingebrachter z-Pins gleichzeitig jedoch zu einer Verbesserung der interlaminaren Risszähigkeit und der Schadenstoleranz führt [2, 7–9], ergibt sich bei der Auslegung von z-Pin-verstärkten FKV ein gewisser Zielkonflikt.

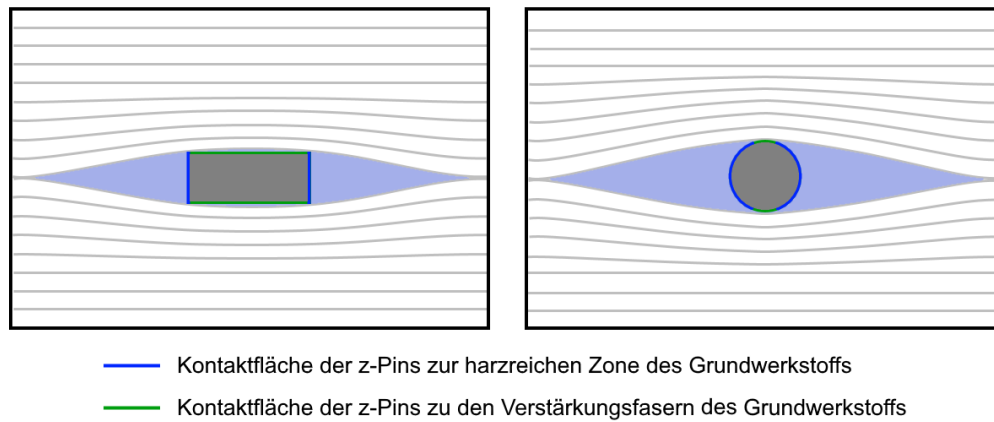


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der Kontaktzonenbereiche zwischen Pin und Laminat für rechteckige und kreisrunde z-Pins

Kreisrunde z-Pins, wie sie heute überwiegend untersucht und eingesetzt werden, stellen sowohl in Bezug auf die in-plane- als auch die bruchmechanischen Eigenschaften keine optimale Lösung dar. Gegenüber sämtlichen denkbaren Querschnittsgeometrien weisen diese bei gegebener Querschnittsfläche die kleinste Pinoberfläche auf. Da die Brückenkräfte zwischen den Rissflanken, die durch eine z-Pin-Verstärkung erzeugt werden, ausschließlich über die Kontaktfläche zwischen Pin und Laminat übertragen werden können, stellen kreisrunde z-Pins zwangsläufig vergleichsweise geringe Brückenkräfte zur Verfügung. Gleichzeitig führen diese jedoch formbedingt zu einer starken Beeinflussung der Mikrostruktur innerhalb des Werkstoffs. Eine Veränderung der Querschnittsgeometrie der Pins erscheint daher als ein zielführender Ansatz die Kontaktfläche zwischen Pin und Laminat zu vergrößern und gleichzeitig die negativen Eigenschaften auf die Mikrostruktur zu verringern. So stellen beispielsweise rechteckige z-Pins mit einem Höhen/Breiten-Verhältnis von 2:1, gegenüber kreisrunden z-Pins mit identischer Querschnittsfläche, eine um 20 % vergrößerte Kontaktfläche zum Laminat zur Verfügung. Aufgrund der veränderten Querschnittsgeometrie reduziert sich gleichzeitig die Breite der Pins in Faserrichtung um 37 %.

In heißaushärtenden z-Pin-verstärkten Laminaten kommt es aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) von z-Pin und Laminat während der Abkühlung von der Aushärtetemperatur zu thermischen Eigenspannungen und dadurch hervorgerufenen Schädigungen der Pin-Laminat-Grenzfläche. Analysen der Mikrostruktur z-Pin-verstärkter Lamine sowie numerische Untersuchungen der Spannungszustände in der Grenzfläche zwischen Pin und Laminat haben gezeigt, dass sich diese nicht gleichmäßig über den Umfang des Pins verteilen, sondern dort besonders ausgeprägt sind, wo sich der Pin in direktem Kontakt mit der bei der Pineinbringung entstehenden harzreichen Zone befindet [10–13]. Wie in Abbildung 1.1 dargestellt, verändert sich je nach eingesetzter Pin-geometrie der prozentuale Anteil der Pinoberfläche, der im Laminat mit den Verstär-

kungsfasern des Grundwerkstoffs bzw. der Reinharzzone in Kontakt steht. In Verbindung mit heißaushärtenden Matrixsystemen wird daher erwartet, dass neben der reinen Größe der Pinoberfläche die Veränderung des Anteils der unterschiedlichen Kontaktzonenbereiche einen zusätzlichen Einfluss auf die Höhe der übertragbaren Brückenkräfte hat.

Dass rechteckige z-Pins in kaltaushärtenden Laminaten gegenüber kreisrunden Pins zu einer Steigerung der quasi-statischen in-plane- und bruchmechanischen Eigenschaften unter Mode-I-Beanspruchung führen, konnte von Knaupp et al. [14–16] bereits nachgewiesen werden. In Verbindung mit heißaushärtenden, vor allem in der Luftfahrtindustrie höchst relevanten Prepreg-Halbzeugen liegen hingegen bisher keine Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss von rechteckigen z-Pins auf die mechanischen Lamineigenschaften vor. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die systematische Untersuchung des Einflusses rechteckiger z-Pins auf die mechanischen Eigenschaften heißaushärtender CFK-Lamine unter quasi-statischer sowie schwingender Beanspruchung.

Die mechanischen Eigenschaften eines z-Pin-verstärkten Laminats sind stark von der vorliegenden Mikrostruktur abhängig. Im ersten Teil der Arbeit wird daher zunächst die Auswirkung einer veränderten Pingeometrie auf die mikrostrukturellen Eigenschaften von z-Pin-verstärkten unidirektionalen (UD) und quasi-isotropen (QI) CFK-Laminaten untersucht. Dabei steht vor allem die Ermittlung des Einflusses von rechteckigen und kreisrunden z-Pins auf die resultierenden Faserwelligkeitswinkel, die Grenzflächeneigenschaften zwischen Pin und Laminat sowie die Inklinationswinkel der z-Pins im Vordergrund.

Welche Prozesse bei der Ausbildung von Wärmeeigenstressungen in der Pin-Laminat-Grenzfläche während der Abkühlung von der Aushärtetemperatur eine Rolle spielen, wird im zweiten Teil der Arbeit anhand einer Finite-Elemente (FE)-Analyse untersucht. Mithilfe von Einheitszellenmodellen werden dabei die in der Grenzfläche wirkenden Beanspruchungen identifiziert und Unterschiede im Grenzflächenzustand im Anschluss an die Heißaushärtung zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins herausgearbeitet.

Im experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit werden zunächst die während der Rissöffnung übertragenen Brückenkräfte für rechteckige und kreisrunde Pins im sogenannten Pin-Pullout-Versuch ermittelt. Anhand der daraus gewonnenen Brückenkraftkurven wird der Einfluss der z-Pin-Geometrie auf die maximal erreichbaren Brückenkräfte, die dabei auftretenden Spannungen in der Pin-Laminat-Grenzfläche sowie die während des Pinauszugs dissipierte Energie ermittelt. Zudem wird ein Zusammenhang zwischen den zuvor in den Mikrostruktur- und FE-Untersuchungen erlangten Erkenntnissen und den experimentellen Ergebnissen hergestellt.

Unter Berücksichtigung der erlangten Erkenntnisse zu den erzielbaren Brückenkräften rechteckiger und kreisrunder z-Pins werden anschließend die Auswirkungen der Pingeometrie auf die bruchmechanischen Eigenschaften heißaushärtender FKV-Werkstoffe unter Mode-I- und Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung ermittelt. Neben dem Einfluss der Pingeometrie auf die interlaminaire Bruchzähigkeit wird dabei auch das Risswachstumsverhalten unter schwingender Beanspruchung untersucht und die Ergebnisse rechteckiger und kreisrunder z-Pins gegenübergestellt.

Einen weiteren experimentellen Schwerpunkt dieser Arbeit stellt zudem die Untersuchung der Abhängigkeit der mechanischen in-plane-Eigenschaften unter Zug- und Druckbelastung von der verwendeten z-Pin-Verstärkung dar. Dabei wird der Einfluss der Pingeometrie auf die quasi-statischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte sowie das Ermüdungsverhalten von z-Pin-verstärkten Prüfkörpern unter schwingender Beanspruchung untersucht und die erzielten Ergebnisse unter Berücksichtigung der zuvor untersuchten Mikrostruktur, die sich durch das Einbringen rechteckiger bzw. kreisrunder z-Pins ausbildet, ausgewertet.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine strukturierte Zusammenfassung der erzielten Erkenntnisse und die Einordnung dieser in den wissenschaftlichen Kontext. Zusätzlich werden auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit die Anwendungsperspektiven des z-Pinnings erörtert und ein kurzer Ausblick auf mögliche aufbauende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Verbindung mit alternativen Querschnittsgeometrien von z-Pins gegeben.



## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die ersten Verfahren zur Einbringung von z-Pins in Faserverbundkunststoffe wurden bereits Ende der 80er Jahre in den USA zum Patent angemeldet. In zahlreichen analytischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen wurden seither die Auswirkungen von z-Pins auf unterschiedlichste mechanische und mikrostrukturelle Eigenschaften von FKV-Laminaten untersucht. Insbesondere in den 2000er Jahren entstand dabei eine Vielzahl von wissenschaftlichen Beiträgen. Trotz intensiver Forschungsanstrengungen findet das z-Pinning bisher jedoch mit wenigen Ausnahmen keine nennenswerte praktische Anwendung und stellt seit einiger Zeit ein ausgesprochenes Nischenthema innerhalb der Forschung an Faser-Kunststoff-Verbunden dar. Es ist daher kaum verwunderlich, dass sich heute weltweit nur noch wenige Institute intensiv mit diesem Thema auseinandersetzen. Einen Überblick über die zurzeit aktivsten Einrichtungen, die zusammen einen Großteil der aktuellen Forschungsarbeit unter sich aufteilen, gibt Abbildung 2.1.

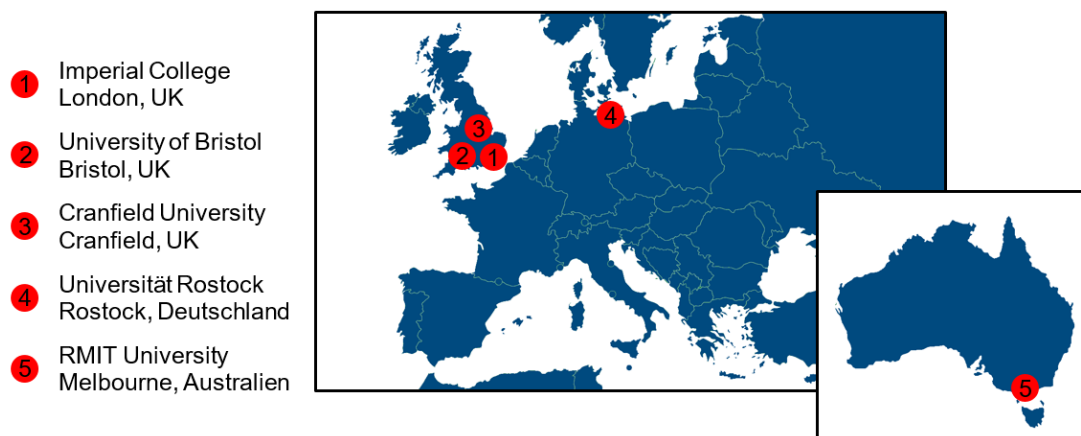


Abbildung 2.1: Überblick über die weltweit aktivsten Forschungseinrichtungen im Bereich der z-Pin-Verstärkung

Es existiert heute ein breites Spektrum wissenschaftlicher Untersuchungen zum Thema z-Pinning, dessen Kenntnis von den Lesern dieser Arbeit nicht vorausgesetzt werden kann. Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik, der zum Verständnis der vorliegenden Arbeit benötigt wird, ist daher Gegenstand des folgenden Kapitels.

## 2.1 Translaminare Verstärkung von Faserverbundwerkstoffen

Um der geringen Delaminationsfestigkeit und Schadenstoleranz von klassischen FKV-Werkstoffen entgegen zu wirken, die durch das Fehlen von Verstärkungsfasern in Dickenrichtung verursacht werden, existieren heute eine Reihe von geeigneten Verfahren zur translaminaren Verstärkung von FKV. Das gemeinsame Wirkprinzip dieser Verfahren beruht dabei auf der Veränderung der klassischen zweidimensionalen (2D) Faserstruktur von FKV-Bauteilen, sodass diese anschließend einen gewissen Anteil an Verstärkungsfasern in z-Richtung aufweisen. Dabei kann nach der direkten Erzeugung dreidimensionaler (3D) Faserstrukturen sowie der geeigneten Behandlung bereits vorhandener 2D-Faserlagen unterschieden werden.

Möglichkeiten zur direkten Herstellung dreidimensionaler Faserstrukturen sind beispielsweise die in Abbildung 2.2 dargestellten Verfahren des Verwebens, Verstrickens und Verflechtens der Verstärkungsfasern. Ein zusätzlicher Vorteil dieser Verfahren ist dabei die einfache Handhabung im weiteren Herstellungsprozess. Durch die entstehende zusammenhängende Struktur der Fasern können diese endformnah in oder auf dem Formwerkzeug platziert und mit Harz getränkt werden, anstatt wie üblich einzelne Faserlagen vor dem Imprägnieren schichtweise zu drapieren und auszurichten [17].

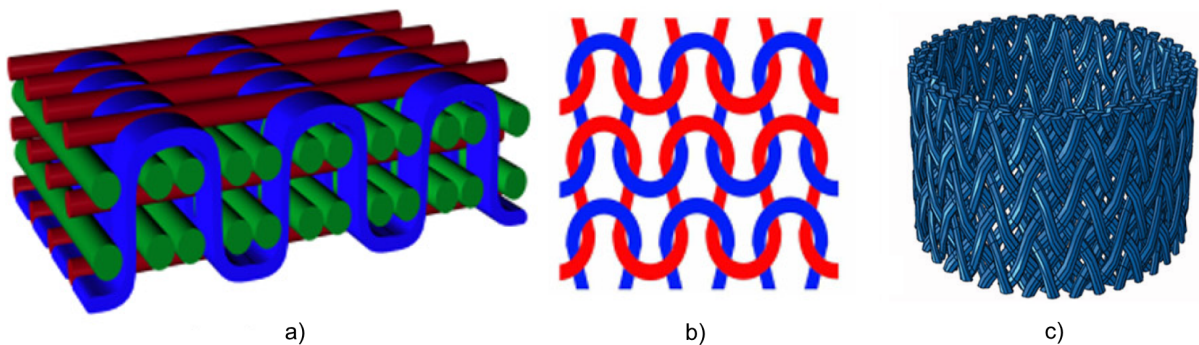


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des (a) Verwebens [18], (b) Verstrickens [18] und (c) Verflechtens [19] von trockenen Faserhalbzeugen

Bekannte Verfahren zur Verstärkung bereits vorhandener zweidimensionaler Faserhalbzeuge in z-Richtung sind hingegen das Vernähen der einzelnen Faserlagen miteinander und das sogenannte z-Anchoring, bei dem eine gewisse Anzahl der Verstärkungsfasern des ursprünglich rein zweidimensionalen textilen Halbzeugs mit speziellen Nadeln in z-Richtung ausgelenkt wird und diese so die einzelnen Faserschichten miteinander verbinden. Beide Verfahren sind zur besseren Veranschaulichung in Abbildung 2.3 dargestellt.

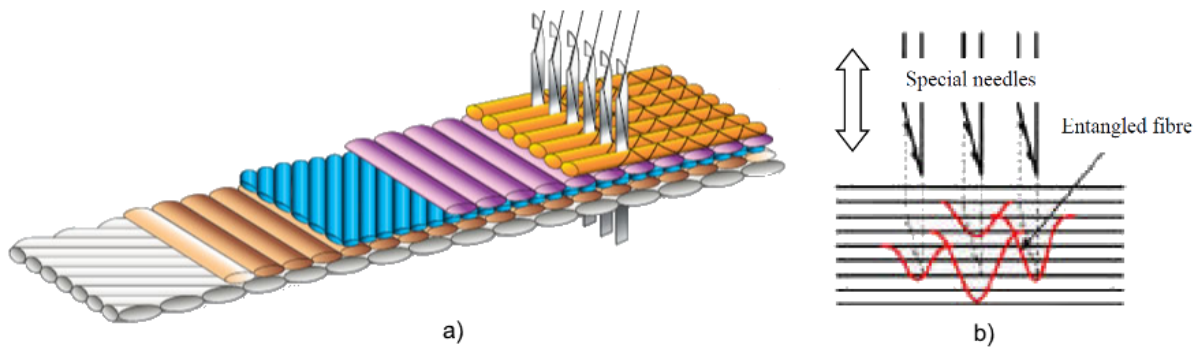


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des (a) Vernähens [20] und des (b) z-Anchoring [17] von trockenen Faserhalbzeugen

Alle genannten Verfahren stellen dabei bewährte Möglichkeiten der 3D-Verstärkung von trockenen Faserhalbzeugen dar. Vor allem in der Luftfahrtindustrie, die eines der bedeutendsten Anwendungsfelder faserverstärkter Kunststoffe darstellt, kommen jedoch überwiegend vorimprägnierte Faserhalbzeuge zum Einsatz, in denen die Fasern zur besseren Handhabung und zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität bereits mit dem Matrixharz getränkt sind. Zwar gab es bereits erste Versuche das Vernähen einzelner Faserlagen auf diese Werkstoffe anzuwenden [21], das Durchdringen der viskosen Prepregschichten mit der Nadel bringt dabei jedoch einige Schwierigkeiten mit sich [17]. Die dreidimensionale Verstärkung von aus Prepregmaterialien hergestellten FKV-Werkstoffen erfolgt daher in der Regel mithilfe des z-Pinning-Verfahrens, dessen Wirkmechanismen und dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von FKV-Werkstoffen in den nachfolgenden Kapiteln dieser Arbeit ausführlich beschrieben werden.

## 2.2 Herstellung von z-Pin-verstärkten Laminaten

Für die Insertion von z-Pins in duroplastische FKV-Werkstoffe steht heute eine Vielzahl von unterschiedlichen Einbringverfahren zur Verfügung [15, 22–30]. Dabei hat sich vor allem die ultraschallgestützte Pineinbringung im sogenannten UAZ-Verfahren (Ultrasonically Assisted Z-fiber Process) gegenüber anderen Methoden durchgesetzt. Bei diesem bereits 1996 durch die Foster-Miller Inc. [22] patentierten Verfahren wird das zu verpinende Bauteil zunächst wie üblich aus Prepreg-Material aufgebaut. Noch vor der Aushärtung im Autoklaven wird die sogenannte Pin-Preform an der zu verstärkenden Stelle der Struktur platziert. Diese besteht wie in Abbildung 2.4 dargestellt aus zwei Schäumen unterschiedlicher Dichte, in die die z-Pins in einem definierten Muster und Abstand zueinander eingebracht sind.

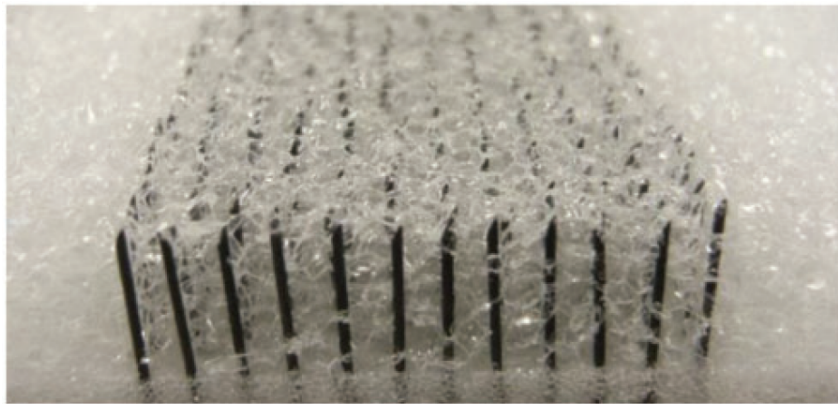


Abbildung 2.4: Kommerziell erhältliche Pin-Preform mit kreisrunden z-Pins [27]

Die Einbringung der z-Pins erfolgt anschließend mit Hilfe eines manuell oder automatisch geführten Ultraschallkopfes. Dieser wird mit einer hochfrequenten Schwingung angeregt und vollzieht gleichzeitig eine translatorische Bewegung in z-Richtung. Bei in Kontakt treten mit den Pins beginnen diese zu schwingen, wodurch der Matrixwerkstoff lokal aufgeweicht und damit die Penetration des Laminats durch die z-Pins erleichtert wird. Nach vollständiger Durchdringung des Laminats durch die z-Pins werden überstehende Pinenden sowie Schaumreste mit Hilfe eines scharfen Werkzeugs vorsichtig vom Laminat entfernt und das in Dickenrichtung verstärkte Bauteil im Autoklaven ausgehärtet. Der vollständige Fertigungsablauf von der Positionierung der Pin-Preform bis zum fertigen Bauteil ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

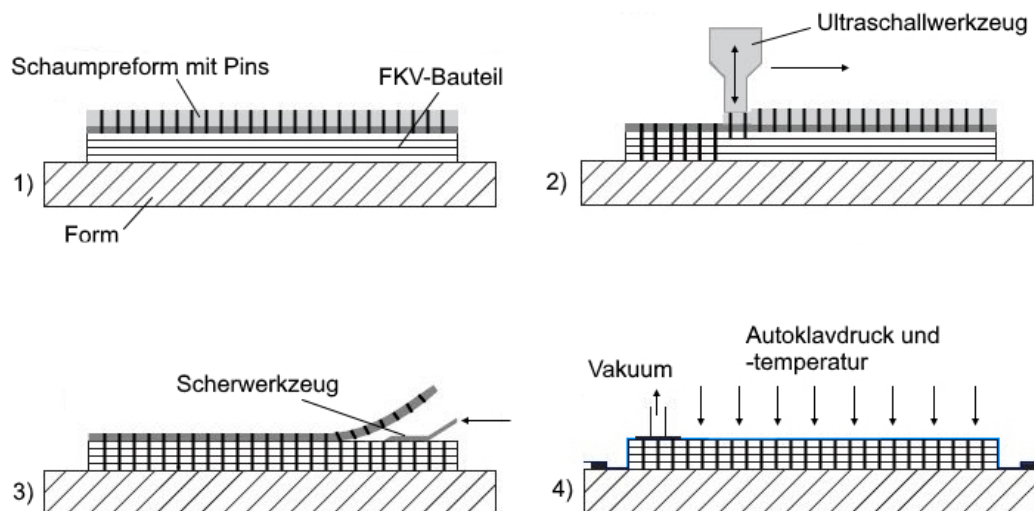


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses z-Pin-verstärkter Lamine im UAZ-Verfahren

## 2.3 Wirkmechanismen der z-Pin-Verstärkung

Hat sich in einem z-Pin-verstärkten Faserverbundwerkstoff ein Riss zwischen zwei Faserlagen ausgebildet, sind die im Werkstoff befindlichen z-Pins durch das Übertragen von Brückenkräften zwischen den Rissflanken in der Lage die Spannung an der Rissspitze zu reduzieren und so der weiteren Rissöffnung entgegenzuwirken. Mit fortschreitendem Risswachstum bildet sich dabei im Laminat eine Brückenzone aus, in der die z-Pins in Abhängigkeit von ihrer Position relativ zur Rissspitze unterschiedlich starke Brückenkräfte zur Verfügung stellen. Die während des Rissfortschritts wirkenden Mechanismen der Brückenkrafterzeugung unterscheiden sich dabei für verschiedene Beanspruchungszustände des Risses grundlegend. Zur Beschreibung der Wirkmechanismen einer z-Pin-Verstärkung muss daher zwingend nach der Art der Rissöffnungsbeanspruchung unterschieden werden.

Abhängig von der äußeren Last und der Lage der Rissspitze kann die Beanspruchung an einem interlaminaren Riss durch eine der drei in Abbildung 2.6 dargestellten grundlegenden Rissbeanspruchungsarten oder eine Kombination dieser beschrieben werden. Die bei der Rissöffnung wirkenden Verstärkungsmechanismen der eingebrachten z-Pins sind dabei für Mode-II- und Mode-III-Beanspruchungen identisch. Bei der Beschreibung der Wirkmechanismen einer z-Pin-Verstärkung wird daher in der Regel lediglich zwischen Mode-I- und Mode-II-Beanspruchungen unterschieden.

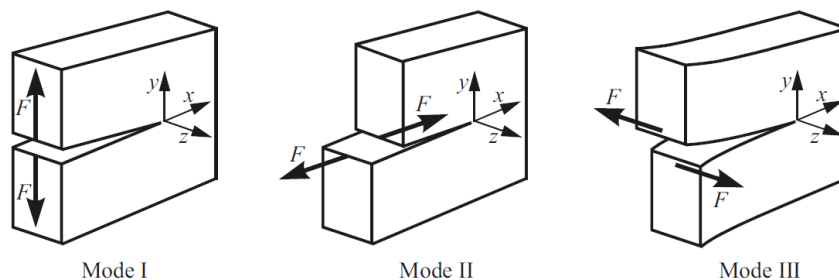


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der drei grundlegenden Rissbeanspruchungsarten der Bruchmechanik [31]

Unter Mode-I-Rissöffnungsbeanspruchung wird in der Regel von drei Phasen, in denen der Brückenkrafterzeugung unterschiedliche Verstärkungsmechanismen zu Grunde liegen, unterschieden [32–35]. Abbildung 2.7 zeigt dazu schematisch die sich ausbildende Brückenzone eines z-Pin-verstärkten Laminats unter Mode-I-Beanspruchung. Nach Erreichen der Rissfront an einem Pin wird dieser zunächst elastisch verformt und wirkt dabei wie eine Feder der Rissöffnung entgegen. In dieser Phase wird die Brückenkraft über die Anhaftung des z-Pins am Grundwerkstoff in der Pin-Laminat-Grenzfläche erzeugt. Übersteigt die in

der Grenzfläche wirkende Schubspannung ihre Festigkeit, löst sich der z-Pin schlagartig vom Laminat ab. Bei weiterem Fortschreiten der Rissfront wird der Pin reibungsbehaftet aus dem Laminat gezogen und wirkt dabei weiterhin der Rissöffnung entgegen.

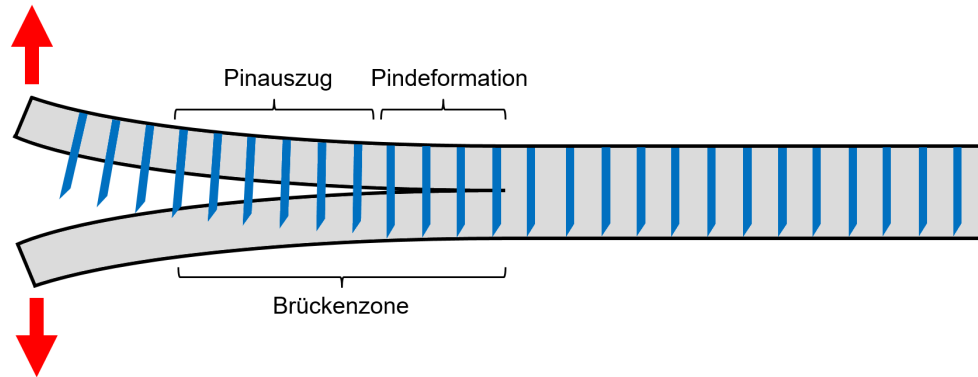


Abbildung 2.7: Ausbildung einer z-Pin-Brückenzone unter Mode-I-Beanspruchung

Das Versagensverhalten der z-Pins verändert sich mit Verschiebung des Beanspruchungszustands in der Risspitze in Richtung einer Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung. Anstatt durch das vollständige Herausziehen wird das Versagen dabei zunehmend durch einen vorzeitigen Bruch der z-Pins in der Rissebene gekennzeichnet [36]. Die unter reiner Mode-II-Beanspruchung in der Brückenzone wirkenden Verstärkungsmechanismen sind von Pegorin et al. [9] detailliert beschrieben worden. In Abbildung 2.8 ist dazu schematisch das Verhalten der z-Pins innerhalb einer Brückenzone unter Mode-II-Beanspruchung dargestellt. In der Nähe der Risspitze unterliegen die z-Pins demnach, ähnlich wie für Mode-I-Beanspruchungen beschrieben, einer elastischen Deformation und bringen dabei in Abhängigkeit ihrer Steifigkeit Rückstellkräfte auf, die der Rissöffnung entgegen wirken. Schreitet der Riss weiter fort, lösen sich die Pins zunächst vom Laminat ab und beginnen aufgrund der wirkenden Scherbeanspruchung in der Rissebene zu versagen. In der Regel werden die z-Pins dabei bis zu ihrem Versagen nur unwesentlich aus dem Laminat gezogen. Die Entwicklung einer ausreichend langen Brückenzone im Laminat basiert dabei auf der während der Rissflankenverschiebung generierten Reibung zwischen der rauen Bruchkante der Pins und der gegenüberliegenden Rissflanke.

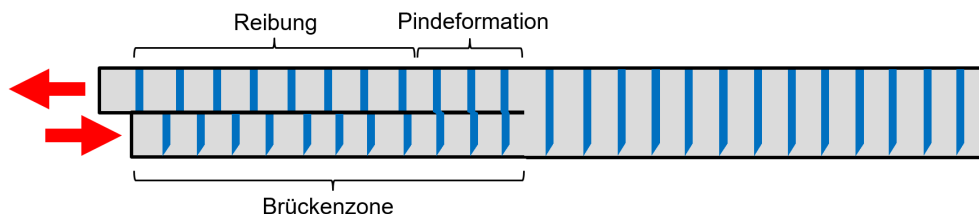


Abbildung 2.8: Ausbildung einer z-Pin-Brückenzone unter Mode-II-Beanspruchung



## 2.4 Mikrostruktur z-Pin-verstärkter Faserverbundwerkstoffe

Inhalt des folgenden Abschnitts ist die Beschreibung der Mikrostruktur z-Pin-verstärkter FKV. Da diese stark von den verwendeten Ausgangsmaterialien, dem Einbringverfahren sowie den Aushärtebedingungen abhängig ist, beschränkt sich der Inhalt dieses Kapitels auf die Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse zur Mikrostruktur von im UAZ-Verfahren verstärkten, heißaushärtenden CFK-Laminaten.

### 2.4.1 Faserumlenkungen und -brüche

Zu den auffälligsten und oft mit bloßem Auge erkennbaren Veränderungen in einem z-Pin-verstärkten Faser-Kunststoff-Verbund zählt die Umlenkung der Verstärkungsfasern des Grundwerkstoffs. Diese entsteht beim Eindringen eines z-Pins in das unausgehärtete Laminat durch die lokale Verdrängung der Fasern aus ihrer ursprünglichen Lage. Dabei muss nach der Richtung, in der die Fasern umgelenkt werden, unterschieden werden. Eine Auslenkung in der Laminebene, also in der x-y-Ebene, wird in diesem Zusammenhang üblicherweise als Faserwelligkeit bezeichnet. Werden die Fasern mit dem Eindringen des Pins in z-Richtung ausgelenkt, wird hingegen von Fasereinzug gesprochen.

In Abbildung 2.9 ist eine Faserschicht, in welcher die Verstärkungsfasern durch das Einbringen eines z-Pins in der x-y-Ebene ausgelenkt sind, schematisch dargestellt. Die Faserwelligkeit kann nach Chang [6] durch die Länge der Faserwelligkeitszone  $x_{FW}$ , ihre Breite  $y_{FW}$  sowie den Faserwelligkeitswinkel  $\Theta$  charakterisiert werden. Der Bereich der maximalen Faserwelligkeit, in welchem  $\Theta$  bestimmt wird, befindet sich dabei an den Flanken der entstehenden Harzzone, kurz bevor die Fasern wieder zusammenführen [5, 37]. Die genannten Kenngrößen können anhand von licht- oder rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gemessen werden. Neben der Abhängigkeit der Faserwelligkeit von der Geometrie der verwendeten Pins hängt ihre Ausprägung ebenfalls von den Eigenschaften des vorimprägnierten Faserhalbzeugs ab. Insbesondere haben die Fasersteifigkeit, der Faservolumengehalt (FVG) und die Viskosität des Matrixmaterials einen Einfluss auf die resultierende Faserumlenkung in der Laminebene [3].

In Abbildung 2.10.a ist die Abhängigkeit des Faserwelligkeitswinkels vom verwendeten Pindurchmesser  $d_{Pin}$  dargestellt. Bis zu einem Pindurchmesser von 1,0 mm konnte dabei ein linearer Zusammenhang zwischen  $\Theta$  und  $d_{Pin}$  festgestellt werden [5]. Abhängig von den Lamineigenschaften und Pindurchmessern wird der Faserwelligkeitswinkel häufig in

einem Wertebereich von etwa  $2,0^\circ$  bis  $7,0^\circ$  angegeben [3, 5, 6, 37, 38]. In Abbildung 2.10.b ist zusätzlich der Anteil ausgelenkter Fasern im Laminat in Abhängigkeit vom Pingeinhalt für einen Pindurchmesser von 0,28 mm dargestellt. Bereits bei niedrigen Pingegehalten weist ein nicht unerheblicher Teil des Laminats Faserwelligkeiten auf, bis ab einem Pingeinhalt von etwas über 5 % theoretisch alle Fasern innerhalb eines FKV-Laminats aus ihrer ursprünglichen Lage ausgelenkt vorliegen [3].

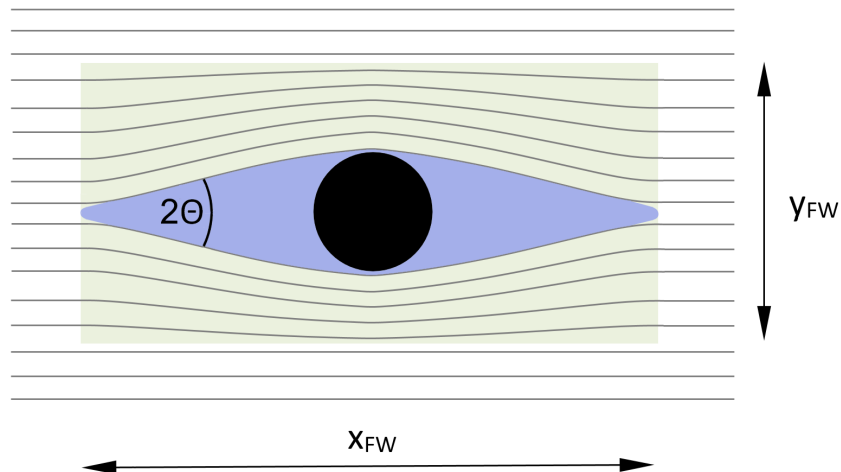


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Faserwelligkeit um einen kreisrunden z-Pin

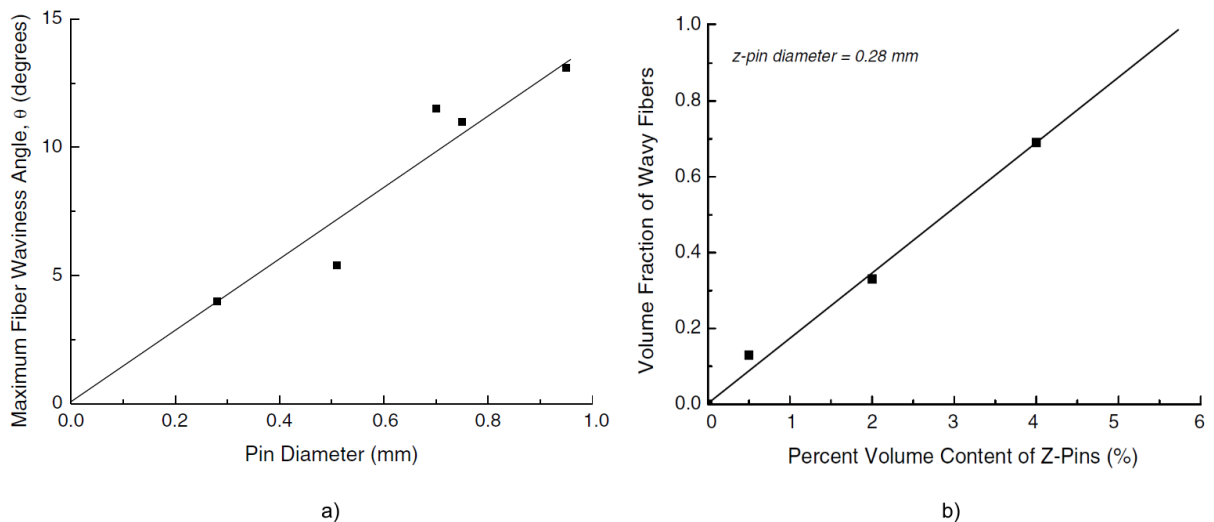


Abbildung 2.10: Darstellung des (a) Faserwelligkeitswinkels in z-Pin-verstärkten Laminaten in Abhängigkeit vom Pindurchmesser [5] und des (b) Anteils umgelenkter Fasern in Abhängigkeit vom Pingeinhalt [3]



Die dargestellten Ergebnisse und Abbildungen beziehen sich ausschließlich auf das Vorliegen einer symmetrischen Faserwelligkeit. Eine nicht exakte Ausrichtung der z-Pin-Reihen mit der Faserorientierung des Laminats sowie eine bereits im Faserhalbzeug vorliegende Abweichungen der Orientierung einiger Fasern kann in der Praxis zu einer asymmetrischen Faserwelligkeit führen [37]. Die dabei entstehenden Faserwelligkeitswinkel sind im Vergleich zu einer symmetrischen Faserwelligkeit etwas größer. Bei der Beschreibung der Mikrostruktur z-Pin verstärkter FKV ist daher eine Unterscheidung beider Faserverläufe von Bedeutung. Der Faserverlauf bei symmetrischer und asymmetrischer Faserwelligkeit ist in Abbildung 2.11 vergleichend dargestellt.

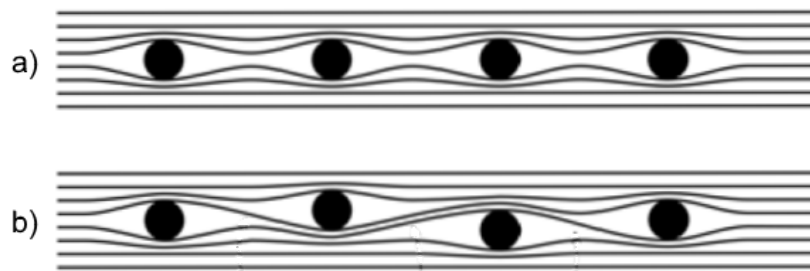


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung (a) symmetrischer und (b) asymmetrischer Faserwelligkeit in einer UD-Schicht [6]

Während die Ausprägung der Faserwelligkeit und ihr Anteil im Laminat sehr gut anhand mikroskopischer Aufnahmen bestimmt werden kann, fällt die Charakterisierung des Fasereinzugs in z-Richtung deutlich schwerer. Aufgrund der bei der Insertion wirkenden Kräfte auf die unterhalb der Pinspitze liegenden Fasern sowie der an der Pinflanke entstehenden Reibungskräfte werden einige Fasern in Einbringrichtung der z-Pins ausgelenkt [4, 5, 39, 40]. Trotz erschwelter Nachweisbarkeit wird im Allgemeinen zusätzlich von einer geringen Anzahl durch den Fasereinzug hervorgerufener gebrochener Fasern in der unmittelbaren Nähe jedes Pins ausgegangen [41].

Die durch den Fasereinzug entstehende Mikrostruktur ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Chang [41] gibt die Fasereinzugswinkel mit etwa  $60^\circ$  bis  $70^\circ$  an. Im Vergleich zur Faserwelligkeit sind die auftretenden Fasereinzugswinkel damit deutlich größer. Durch die im Allgemeinen vorhandene Schrägstellung der Pins im Laminat (Inklination) tritt der Fasereinzug dabei nicht symmetrisch um den Pin auf, sondern verstärkt sich auf der Seite, in die der Pin geneigt ist [41]. Chang spricht daher als Ursache für den Fasereinzug von einer Kombination aus den beiden oben genannten Mechanismen und der Schrägstellung der z-Pins während des Fertigungsprozesses (siehe dazu Abschnitt 2.4.3). Da der Bereich der eingezogenen Fasern auf eine kleine Region in direkter Umgebung zum Pin begrenzt ist, beträgt der Volumenanteil der eingezogenen Fasern nur wenige Prozent [4, 40].

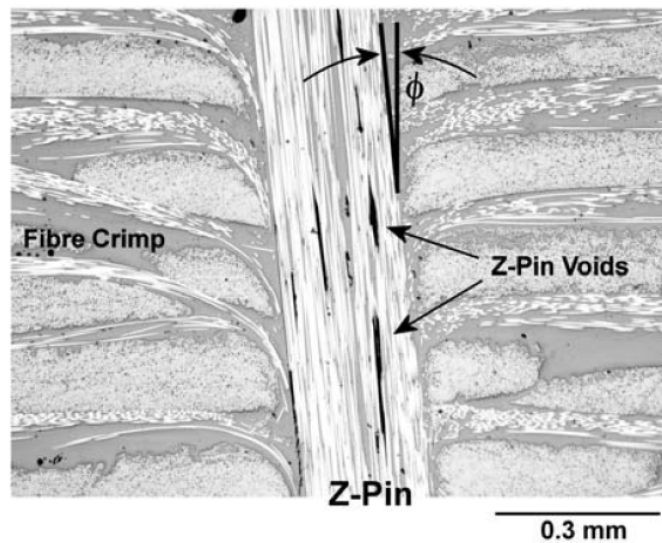


Abbildung 2.12: Fasereinzug in z-Richtung an einem kreisrunden z-Pin [6]

### 2.4.2 Harzreiche Zonen

Durch das im vorherigen Abschnitt beschriebene Ausweichen der Fasern während des Eindringens der z-Pins in den unausgehärteten Werkstoff entstehen zunächst Hohlräume im Laminat. Diese werden während des Aushärtprozesses im Autoklaven mit flüssigem Harz gefüllt und es entstehen, wie in Abbildung 2.13.a dargestellt, sogenannte harzreiche Zonen um jeden Pin. Da sich diese in jeder Einzelschicht entlang der Faserrichtung orientieren, ist es bei multiaxial aufgebauten Laminaten zweckmäßig bei der Beschreibung von Richtungen auf die von Zhang et al. [12] vorgestellte Definition der faserreichen- und der harzreichen Richtung zurückzugreifen. Diese sind gemäß Abbildung 2.13.b lokal definiert und ändern sich global betrachtet in Abhängigkeit der jeweiligen Lagenorientierungen im Laminat.

Sind die Abstände der z-Pins ausreichend groß, bilden sich im Werkstoff räumlich getrennte harzreiche Zonen aus. Unterschreitet jedoch der Abstand der eingebrachten Pins die Länge der Reinharzbereiche, zum Beispiel aufgrund eines hohen Pingehalts, kommt es zu einer Verbindung von benachbarten harzreichen Zonen und es entstehen sogenannte Harzkanäle entlang der Faserrichtung. Da die Fasern in diesem Fall zwischen den Pins nicht aufeinandertreffen, geht mit dem Auftreten von Harzkanälen eine Reduzierung der Faserwelligkeit einher. Während der Faserwelligkeitswinkel für diskrete Harzzonen je nach Pindurchmesser mit bis zu  $7,0^\circ$  angegeben wird [3, 5, 6, 37, 38], wurden von Mouritz [5] in Verbindung mit Harzkanälen maximale Faserwelligkeitswinkel von etwa  $2,0^\circ$  gemessen.

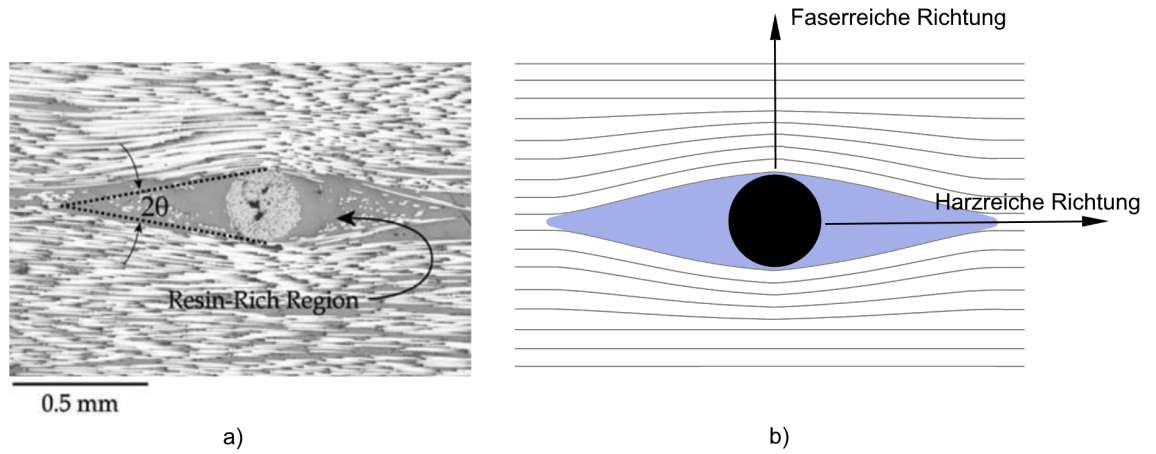


Abbildung 2.13: Darstellung einer (a) harzreichen Zone in einem z-Pin-verstärkten Laminat [6] und (b) Definition der harzreichen und faserreichen Richtung in einer UD-Schicht

### 2.4.3 Inklinationswinkel

Obwohl in der Regel eine senkrechte Einbringung der z-Pins in den Werkstoff angestrebt wird, liegen diese im ausgehärteten Bauteil häufig nicht ideal senkrecht, sondern unter einem leichten Winkel zur z-Achse im Werkstoff vor. Diese ebenfalls in Abbildung 2.12 dargestellte Schrägstellung der Pins wird im Allgemeinen als Inklinationswinkel  $\Phi$  beschrieben, welcher die Winkelabweichung des Pins gegenüber der angestrebten senkrechten Einbringrichtung angibt. Der in der Abbildung dargestellte Inklinationswinkel beschreibt dabei lediglich die Schrägstellung des Pins in der dargestellten Schliffebene. Da sich der Schrägstellungswinkel der z-Pins jedoch in der Regel räumlich ausbildet, lässt sich dieser aus seinen beiden Einzelkomponenten  $\Phi_x$  in x-Richtung und  $\Phi_y$  in y-Richtung zusammensetzen, sodass gilt:

$$\Phi = \tan^{-1} \sqrt{\tan^2 \Phi_x + \tan^2 \Phi_y} \quad (2.1)$$

Ausführliche Untersuchungen zum durchschnittlichen Inklinationswinkel von z-Pins in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen wurden von Chang et al. durchgeführt und veröffentlicht [6, 41]. Die Darstellung der ermittelten Inklinationswinkel in einem Histogramm zeigt dabei eine statistische Winkelverteilung, welche näherungsweise durch eine gauß'sche Normalverteilung beschrieben werden kann (Abbildung 2.14). Chang et al. geben dabei den durchschnittlichen Inklinationswinkel in unidirektionalen CFK-Laminaten mit 23° für einen Pindurchmesser von 0,51 mm an.

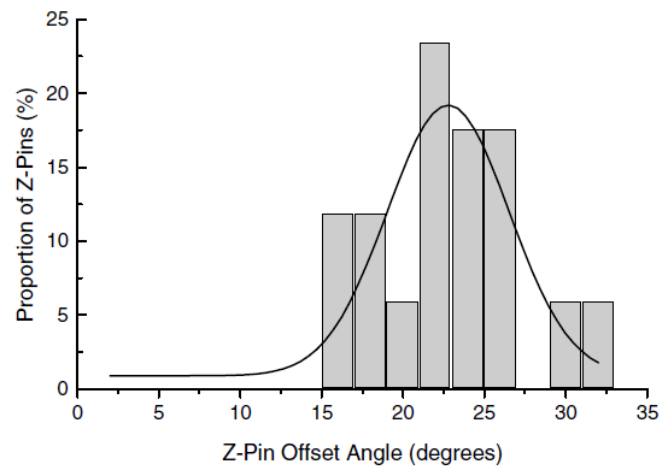


Abbildung 2.14: Verteilung der Inklinationwinkel in einem UD-Laminat für kreisrunde z-Pins mit einem Durchmesser von 0,51 mm [41]

Die Schrägstellung der z-Pins im ausgehärteten Laminat ist stark prozessabhängig und lässt sich in Zusammenhang mit dem UAZ-Einbringverfahren nur schwer vermeiden bzw. verringern. Im Allgemeinen sind die z-Pins bereits leicht geneigt in die Pin-Preform eingebracht. Auf diese Weise soll eine Verkipfung um die angeschäftete Pinspitze während des Einbringprozesses ausgeglichen werden und sich der Pin nach Abschluss der Insertion senkrecht im Laminat befinden. Abbildung 2.15 zeigt, dass der Inklinationwinkel direkt im Anschluss an den Einbringprozess in der Tat vergleichsweise gering ist. Das Abscheren der überstehenden Pinenden führt hingegen zu einer spürbaren Zunahme von  $\Phi$ , wobei die Neigung der Pins in Richtung der aufgetragenen Scherkräfte erfolgt. Diese verstärkt sich während des Aushärtprozesses aufgrund der Kompaktierung des Laminats durch den Autoklavdruck noch einmal deutlich auf den letztendlich im ausgehärteten Laminat messbaren Inklinationwinkel der Pins.

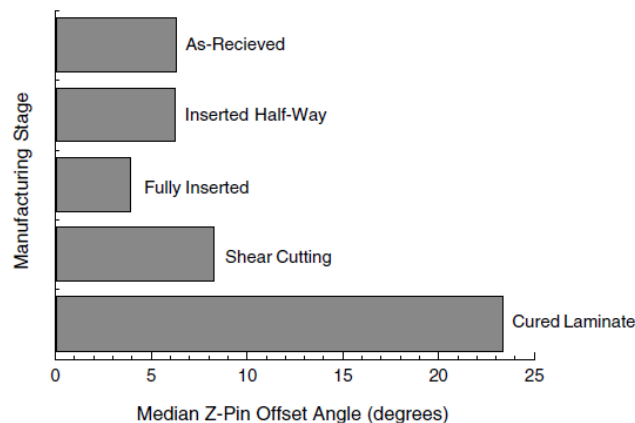


Abbildung 2.15: Inklinationwinkel kreisrunder z-Pins mit einem Pindurchmesser von 0,51 mm in unidirektionalen Laminaten während unterschiedlicher Phasen des Herstellungsprozesses [41]

### 2.4.4 Pin-Laminat-Grenzfläche

Der Ausprägung der Pin-Laminat-Grenzfläche kommt bei der Übertragung von Brückenkräften eine entscheidende Rolle zu. Im Idealfall liegt deshalb eine ungestörte Verbindung bzw. Verklebung zwischen dem z-Pin und dem umgebenden Matrixmaterial des Grundlaminats vor. In Verbindung mit heißaushärtenden FKV und CFK-Pins zeigen sich in der Praxis jedoch bereits vor der Aufbringung äußerer Lasten häufig Risse und Brüche in der Grenzfläche, welche die Anbindung zwischen Pin und Laminat schwächen und somit Einfluss auf das Auszugsverhalten der z-Pins nehmen. In Abbildung 2.16 sind diese Grenzflächenrisse anhand von Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen eines Quer- und eines Längsschnitts durch einen kreisrunden z-Pin dargestellt.

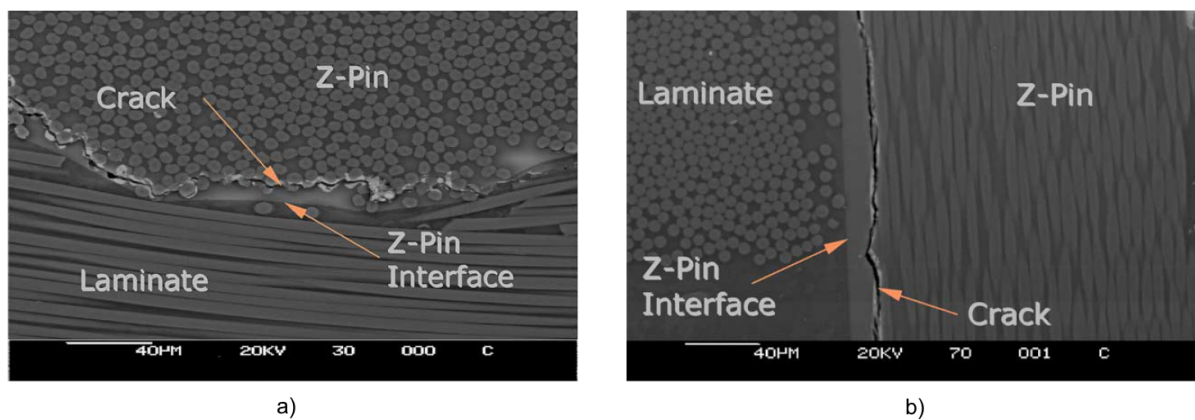


Abbildung 2.16: REM-Aufnahmen von Grenzflächenrissen zwischen Pin und Laminat im (a) Quer- und (b) Längsschnitt durch einen kreisrunden z-Pin [10]

Grenzflächenrisse zwischen CFK-Pins und dem umgebenden Laminat wurden bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen anhand von Mikroskopaufnahmen nachgewiesen [3, 4, 33, 39, 42]. Verantwortlich dafür sind die stark differierenden Wärmeausdehnungskoeffizienten von z-Pin und Laminat in die unterschiedlichen Raumrichtungen und die damit einhergehende Ausbildung von Wärmeeigenspannungen während des Abkühlvorgangs nach erfolgter Heißaushärtung. Diese führen letztlich nach Überschreiten der Grenzflächenfestigkeit zu den beobachteten Rissen zwischen Pin und Laminat.

Aufgrund der Abhängigkeit der Wärmespannungen von verwendeten Pin- und Matrixmaterialien, dem Aushärte- und Abkühlprozess sowie mikrostrukturellen Unregelmäßigkeiten im Werkstoff [33], lässt sich die Beschaffenheit der Grenzfläche im Vorfeld der Laminatherstellung nicht sicher vorhersagen. Auch angefertigte Schliffbilder der Pin-Laminat-Grenzfläche stellen lediglich Momentaufnahmen an einer konkreten Position im Werkstoff dar und liefern keine Hinweise auf die Wärmespannungsverteilung über die gesamte

Pinoberfläche. In der jüngeren Vergangenheit sind daher vermehrt Finite-Elemente-Analysen durchgeführt worden, welche einen ganzheitlichen Aufschluss über den Zustand der Grenzfläche im Anschluss an den Abkühlvorgang geben sollen. Diese zeigen, dass sich die Wärmeeigenstressungen nicht homogen über die gesamte Mantelfläche des Pins verteilen, sondern in den Bereichen der Grenzfläche besonders stark ausgeprägt sind, welche in die harzreiche Richtung weisen [10–13]. Während sich in unidirektionalen FKV daher die durch die Wärmespannungen hervorgerufenen Ablösungen von z-Pins vorwiegend auf die Bereiche entlang der Kontaktfläche zwischen z-Pin und Harzzone beschränken, führt die wechselnde Faserorientierung in QI-Laminaten häufig zu einer nahezu vollständigen Ablösung des Pins während der Abkühlung von der Aushärtetemperatur [12].

### 2.4.5 Reduzierung des Faservolumengehalts

Eine weitere durch das Einbringen von z-Pins in Faserverbundwerkstoffe hervorgerufene Mikrostrukturbeeinflussung ist die Erhöhung der resultierenden Bauteildicke, welche mit einer Reduzierung des Faservolumengehalts gegenüber unverpinnten Faserverbundwerkstoffen einhergeht [5, 6, 39, 41]. Im Allgemeinen werden in diesem Zusammenhang zwei Mechanismen genannt, die gemeinsam für die quantitative Ausprägung der Volumenzunahme verpinnter FKV-Werkstoffe verantwortlich sind [5, 6, 41]. Zum einen ist dies die Ausdehnung des Laminats, die notwendig ist, um die z-Pins aufnehmen zu können. Insbesondere, wenn die Ausdehnung des Werkstoffs in der x-y-Ebene während der Aushärtung behindert wird, entsteht eine Aufdickung des Laminats in z-Richtung, um die Pins und die dazugehörigen harzreichen Zonen aufnehmen zu können. Ein zweiter Mechanismus, der häufig im Zusammenhang mit der Volumenzunahme verpinnter FKV-Lamine genannt wird, ist das Behindern der Kompaktierung des Laminats im Autoklavprozess durch die z-Pins. Bei geschlossenen Werkzeugen halten die steifen, in Dickenrichtung eingebrachten z-Pins dabei die Werkzeughälften auf Abstand und behindern auf diese Weise die komplette Kompaktierung des Laminats während des Aushärtprozesses.

Über die Größenordnung der Volumenzunahme werden in den entsprechenden themenrelevanten Publikationen verschiedene Angaben gemacht. Während Chang [6] von einer prozentualen Zunahme der Laminatdicke berichtet, die in etwa dem Volumengehalt der eingebrachten z-Pins entspricht, konnte Mouritz [5] bei gleichen Pingegehalten eine deutlich stärkere Zunahme der Laminatdicke feststellen. Eine Übersicht über bisher veröffentlichte Werte zur Volumenzunahme von verpinnten CFK-Laminaten liefert Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Ergebnisse von Chang [6] und Mouritz [5] zur Volumenzunahme von unidirektionalen CFK-Laminaten mit z-Pin-Verstärkung

Laminataufbau	Material	Pindurchmesser	Pingealt	Volumenzunahme	
				Chang	Mouritz
UD	CFK	0,28 mm	0,5 %	1,5 %	7,0 %
UD	CFK	0,28 mm	2,0 %	2,0 %	8,2 %
UD	CFK	0,28 mm	4,0 %	3,3 %	16,7 %

## 2.5 Mechanische Eigenschaften von z-Pin-verstärkten Faserverbundwerkstoffen

Gegenstand des folgenden Kapitels ist die Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse zum Einfluss einer z-Pin-Verstärkung auf die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen. Wie zuvor für die Mikrostruktur beschrieben, hängen auch die resultierenden mechanischen Eigenschaften verpinnter Lamine neben den Parametern der z-Pin-Verstärkung stark von den verwendeten Ausgangsmaterialien ab, weshalb an dieser Stelle lediglich auf die Erkenntnisse zu den mechanischen Eigenschaften heißaushärtender CFK-Lamine eingegangen wird.

### 2.5.1 Pullout-Eigenschaften

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, werden beim z-Pinning über die vorgestellten Verstärkungsmechanismen Rückstellkräfte hervorgerufen, die für die Steigerung der interlaminaren Risszähigkeit und der Schadenstoleranz von z-Pin-verstärkten FKV verantwortlich sind. Ein häufig genutztes Verfahren diese Kräfte quantitativ zu erfassen ist der sogenannte Pin-Pullout-Versuch. Dabei werden die eingebrachten z-Pins definiert unter senkrechter Abhebung der Rissflanken voneinander aus dem Laminat gezogen und der Verlauf der hervorgerufenen Rückstellkräfte in Abhängigkeit von der Rissöffnung aufgezeichnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienen der Beurteilung der Eigenschaften der Pin-Matrix-Grenzfläche und erlauben unter anderem Rückschlüsse auf die Grenzflächenfestigkeit sowie die Energiemenge, die beim Auszug der Pins aus dem Laminat dissipiert wird.

In der Vergangenheit wurde bereits eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen zum Pullout-Verhalten von z-Pins in FKV-Werkstoffen durchgeführt [8, 14, 16, 33–36, 43–49]. Das Ergebnis dieser Untersuchungen sind sogenannte Brückenkraftverläufe als Darstellung der durch die Pins generierten Rückstellkraft in Abhängigkeit vom Rissöffnungsweg. Dieser häufig dreiphasige Brückenkraftverlauf spiegelt dabei die in Abschnitt 2.3 erläuterten Verstärkungsmechanismen unter Mode-I-Beanspruchung wider. Die erste Phase ist dabei durch einen linearen Anstieg der Brückenkraft bei fortschreitender Rissöffnung gekennzeichnet. Dieser Bereich des Brückenkraftverlaufs, dessen Steigung von der Steifigkeit des verwendeten Pinwerkstoffs und der Pingeometrie abhängig ist, wird durch die elastische Dehnung der Pins im Laminat hervorgerufen. Die Kraftübertragung erfolgt in dieser Phase über die Anhaftung der Pins bzw. im Fall einer durch Wärmeeigenspannungen hervorgerufenen großflächigen Schädigung der Grenzfläche über die Haftreibung zwischen den Pins und dem Laminat [43]. Mit Erreichen des Kraftmaximums erfolgt häufig ein plötzlicher Kraftabfall, welcher nach Überschreiten der Grenzflächenfestigkeit durch das schlagartige Ablösen der z-Pins vom Laminat hervorgerufen wird. Im Anschluss an ihre vollständige Ablösung schließt sich das reibungsbehaftete Herausziehen der Pins aus dem Laminat an. Dieser dritte Bereich ist durch eine stetige Abnahme der übertragenen Brückenkräfte bis zum Erreichen des maximalen Rissöffnungswegs  $\delta_p$  gekennzeichnet. Die Brückenkraft wird in dieser Phase über die Gleitreibung in der Pin-Laminat-Grenzfläche erzeugt [43].

Die häufig vereinfacht als tri-lineare Funktion dargestellten Brückenkraftverläufe können über wenige charakteristische Kenngrößen beschrieben werden. Eine solche vereinfachte Brückenkraftkurve zusammen mit ihren zur Funktionsbeschreibung notwendigen Kennwerten der maximalen Ablösekraft  $P_d$  und der maximalen Reibkraft  $P_f$  sowie ihren zugehörigen Rissöffnungsverschiebungen  $\delta_d$  und  $\delta_f$  ist in Abbildung 2.17 dargestellt.

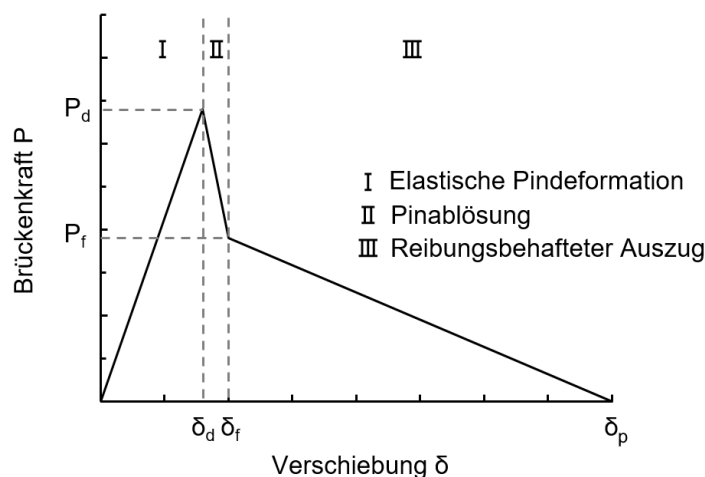


Abbildung 2.17: Vereinfachte Darstellung eines typischen im Pullout-Versuch ermittelten tri-linearen Brückenkraftverlaufs



Die Höhe der im Pullout-Versuch erzielbaren Brückenkräfte ist ein wichtiges Maß für die Wirksamkeit einer eingebrachten z-Pin-Verstärkung unter Mode-I-Beanspruchung. Das Ziel wissenschaftlicher Untersuchungen war daher in der Vergangenheit häufig die Steigerung der maximalen Ablöse- und Reibkraft mit dem Ziel die Wirksamkeit von z-Pins weiter zu erhöhen. Neben der Beeinflussung des Verhältnisses von Pinoberfläche zu ihrer Querschnittsfläche [34], wurden dazu vor allem geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Grenzflächenfestigkeit zum Beispiel durch den Einsatz unterschiedlicher Pinwerkstoffe [8, 35, 44, 46], die Anwendung geeigneter Oberflächenbehandlungen der z-Pins [47, 48, 50], das Aufbringen von Kohlenstoffpartikeln auf die Pinoberfläche [51] oder die Schaffung von Formschluss [52, 53] zwischen Pin und Laminat untersucht.

### 2.5.2 Bruchmechanische Eigenschaften

Der Widerstand gegen das Ausbreiten von Delaminationen im Werkstoff ist eine der am häufigsten untersuchten Eigenschaften von z-Pin-verstärkten FKV-Laminaten. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkmechanismen der im Werkstoff befindlichen z-Pins muss bei der Bestimmung der bruchmechanischen Eigenschaften jedoch zwingend nach dem Beanspruchungszustand an der Risspitze unterschieden werden. Aufgrund zahlreicher numerischer bzw. experimenteller Untersuchungen unter Mode-I- [2, 49, 54–61], Mode-II- [8, 9, 60, 62, 63] und Mixed-Mode-I/II-Rissöffnungsbeanspruchung [8, 64, 65] existiert heute ein breiter Kenntnisstand zu den bruchmechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter FKV. Untersuchungen zum Einfluss einer z-Pin-Verstärkung auf die Mode-III-Eigenschaften von FKV-Laminaten sind hingegen bisher nicht bekannt.

Die Brückenkräfte, die durch die im Laminat befindlichen z-Pins zwischen zwei Rissflanken übertragen werden können, führen zu einer Erhöhung der interlaminaren Bruchzähigkeit z-Pin-verstärkter Lamine gegenüber unverpinnten FKV-Werkstoffen. Zum Vergleich des Risswiderstands unverpinnter und z-Pin-verstärkter Lamine wird dabei in der wissenschaftlichen Literatur üblicherweise ein energiebasierter Ansatz gewählt. Die Energiefreisetzungsrates wird dabei definiert als die Energiemenge  $dU$ , die bei einer Verlängerung eines Risses um  $da$  frei und dabei während der Rissausbreitung dissipiert wird [66]. Wird mit zunehmender Rissbeanspruchung eine unter anderem werkstoffabhängige kritische Energiefreisetzungsrates  $G_c$  überschritten, setzt im Bauteil Risswachstum ein [31].

In den Werkstoff eingebrachte z-Pins sind in der Regel nicht in der Lage die Rissinitiierung zu verhindern [67–70], jedoch nach erfolgter Rissbildung enorm effektiv den Widerstand gegen die weitere Rissausbreitung zu erhöhen. Abbildung 2.18 zeigt dazu den von Cartié [8] bzw. Freitas et al. [7] ermittelten Einfluss des Pingehalts auf die bruchmechanischen Eigenschaften unter Mode-I- bzw. Mode-II-Beanspruchung. Bis zu einem Pingehalt von 2,0 % zeigt sich für z-Pin-verstärkte Lamine ein linearer Zusammenhang zwischen dem Pingehalt und der erzielten kritischen Energiefreisetzungsrate. Dabei ist sowohl für Mode-I- als auch Mode-II-Beanspruchungen eine deutliche Steigerung der kritischen Energiefreisetzungsrate auf ein Vielfaches des Wertes unverpinnter Lamine zu verzeichnen, wobei die Steigerung der kritischen Energiefreisetzungsrate unter Mode-II-Beanspruchung im Allgemeinen etwas weniger deutlich ausfällt [3].

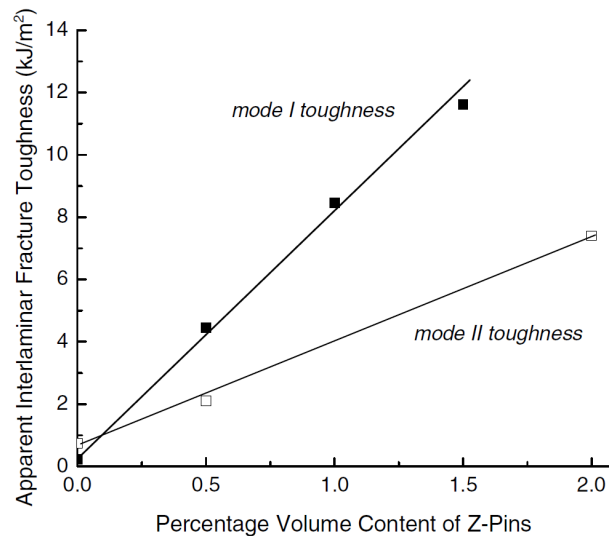


Abbildung 2.18: Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-I- und Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit vom Pingehalt [3]

Gegensätzliche Angaben werden hingegen für beide Rissbeanspruchungsarten hinsichtlich des Einflusses des Durchmessers kreisrunder z-Pins auf die bruchmechanischen Eigenschaften gemacht. Beim Vergleich unterschiedlicher Pindurchmesser konnte Cartié [8] in seinen Untersuchungen zu den Mode-I-Eigenschaften z-Pin-verstärkter Lamine feststellen, dass eine Reduzierung des Pindurchmessers, aufgrund der bei gleichem Pingehalt größeren Pinoberfläche, zu einer Erhöhung des Widerstands gegen das Ausbreiten von Rissen im Laminat führt. Entgegengesetzt verhält sich hingegen der Einfluss des Pindurchmessers auf die bruchmechanischen Eigenschaften unter Mode-II-Beanspruchung. Hier konnten Pegorin et al. [9] ab einer Risslänge von etwa 40 mm durch den Einsatz größerer Pindurchmesser eine Erhöhung der kritischen Energiefreisetzungsrate erzielen.

Unter schwingender Rissöffnungsbeanspruchung führt die Einbringung von z-Pins ebenfalls zu einer Verbesserung der bruchmechanischen Eigenschaften gegenüber unverpinnten Laminaten. In Abbildung 2.19 sind dazu die von Pingkarawat und Mouritz [2] ermittelten Rissfortschrittskurven z-Pin-verstärkter Lamine unter Mode-I-Beanspruchung in Abhängigkeit vom Pindurchmesser und dem Pingegehalt dargestellt. Bis zu einem Volumenanteil von 2,0 % ist für z-Pin-verstärkte FKV dabei eine stetige Verlangsamung des Rissfortschritts mit zunehmendem Pingegehalt festzustellen [2, 71]. Eine weitere Steigerung des Pingegehalts auf 4,0 % führt hingegen zu keiner weiteren Reduzierung der Rissfortschrittsgeschwindigkeit. Analog der Erkenntnisse zur kritischen Energiefreisetzungsrate führt auch unter schwingender Beanspruchung eine Reduzierung des Pindurchmessers zu einer Erhöhung des Widerstands gegen das Ausbreiten von interlaminaren Rissen [2, 71].

Auch unter schwingender Mode-II-Beanspruchung führt die Einbringung von z-Pins zu einer Verlangsamung des Rissfortschritts gegenüber unverpinnten Faserverbundwerkstoffen. Abbildung 2.20 zeigt dazu die von Pegorin et al. [71] ermittelten Rissfortschrittskurven z-Pin-verstärkter FKV-Lamine unter schwingender Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung in Abhängigkeit vom Pindurchmesser und dem Pingegehalt. Analog zu den beschriebenen Erkenntnissen unter Mode-I-Beanspruchung steigt der Risswiderstand dabei mit zunehmendem Pingegehalt stetig an [9, 71]. Einen zusätzlichen Einfluss auf die Rissfortschrittskurven übt der Durchmesser kreisrunder z-Pins aus. Pegorin et al. [9] berichten in diesem Zusammenhang von einer höheren Effektivität der z-Pin-Verstärkung mit steigendem Pindurchmesser.

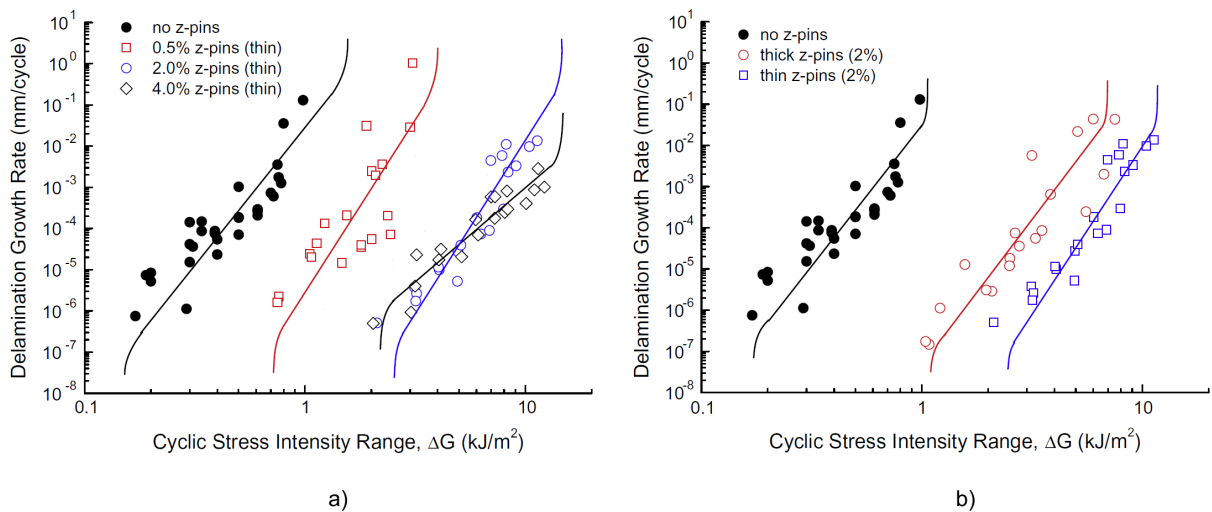
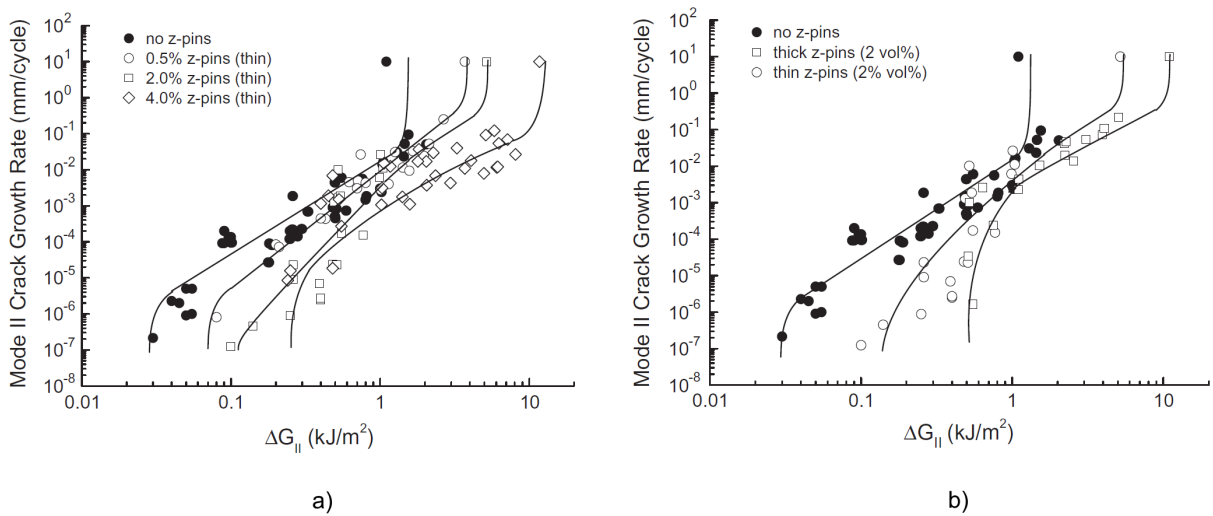


Abbildung 2.19: Rissfortschrittskurven unverpinnter und z-Pin-verstärkter unidirektionaler Prüfkörper unter Mode-I-Beanspruchung in Abhängigkeit vom (a) Pingegehalt ( $\varnothing 0,28$  mm) und (b) Pindurchmesser für kreisrunde z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm (thin) bzw. 0,51 mm (thick) [2]



Abbildungung 2.20: Rissfortschrittskurven unverpinnter und z-Pin-verstärkter unidirektionaler Prüfkörper unter Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit vom (a) Pingealt ( $\Delta G_{II}$ ) und (b) Pindurchmesser für kreisrunde z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm (thin) bzw. 0,51 mm (thick) [71]

### 2.5.3 Impact- und Schadenstoleranzverhalten

Da das Impactverhalten z-Pin-verstärkter Lamine stark von den resultierenden bruchmechanischen Eigenschaften abhängig ist, wird dieses zur Charakterisierung der unterschiedlichen Eigenschaften kreisrunder und rechteckiger z-Pins im Rahmen dieser Arbeit nicht gesondert untersucht. Um jedoch einen vollständigen Überblick über die im Zusammenhang mit der Einbringung von z-Pins relevanten mechanischen Eigenschaften zu geben, befasst sich dieser Abschnitt der Arbeit in aller Kürze mit dem Einfluss einer z-Pin-Verstärkung auf die Impact- und Schadenstoleranzeigenschaften von FKV-Werkstoffen.

Als Impactbeanspruchungen werden schlagartige, senkrecht zur Bauteilebene auftretende Beanspruchungen bezeichnet. Praktische Beispiele im Zusammenhang mit faserverstärkten Kunststoffen sind dabei unter anderem der Hagel- bzw. Vogelschlag bei Verkehrsflugzeugen. Anders als metallische Werkstoffe können FKV die während des Impacts in den Werkstoff eingebrachte Energie in der Regel nicht durch eine plastische Verformung des Werkstoffs absorbieren. Die Energiedissipation findet stattdessen häufig durch die Bildung und Ausbreitung von interlaminaren Rissen statt. In Abhängigkeit von der Impactenergie kann sich die Einbringung von z-Pins in impactgefährdete Bereiche von FKV-Bauteilen dabei positiv auf die resultierende Delaminationsfläche auswirken. In experimentellen Untersuchungen konnte in diesem Zusammenhang eine Verringerung der Delaminationsfläche infolge einer Impactbelastung um bis zu 64 % beobachtet werden [8, 67, 72–74].

Die Resttragfähigkeit impactgeschädigter FKV-Lamine mit und ohne z-Pin-Verstärkung wird häufig anhand der Restdruckfestigkeit in sogenannten Compression after Impact Versuchen miteinander verglichen. Isa et al. [74] konnten dabei in ihren Untersuchungen zeigen, dass die durch die Einbringung von z-Pins reduzierte Delaminationsfläche zu einer deutlichen Steigerung der Restdruckfestigkeit und der Ermüdungseigenschaften gegenüber unverpinnten Laminaten führt.

### 2.5.4 Zugsteifigkeit und -festigkeit

Werden in einen Faserverbundkunststoff z-Pins eingebracht, führen die beschriebenen mikrostrukturellen Veränderungen zu einer Reduzierung der mechanischen Eigenschaften unter Zug- bzw. Druckbelastung, den sogenannten in-plane-Eigenschaften. Betroffen hiervon sind neben der Reduzierung der Werkstofffestigkeit und -steifigkeit ebenso die Zeit- und Dauerfestigkeit im Falle einer schwingenden Beanspruchung. Über das Ausmaß der Reduzierung von Zug- und Druckeigenschaften können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. Vielmehr hängt dieses von einer Reihe von Faktoren ab, die sich mit der gewählten z-Pin-Verstärkung sowie dem Laminataufbau ergeben. In diesem Abschnitt soll zunächst der Stand der Wissenschaft zum Einfluss einer z-Pin-Verstärkung auf die Zugeigenschaften von FKV-Laminaten dargestellt werden. Die Betrachtung der Druckeigenschaften erfolgt separat in Abschnitt 2.5.5.

In Abbildung 2.21 ist die von Chang et al. [41] experimentell ermittelte Abhängigkeit der Zugsteifigkeit von Pindurchmesser und Pingealt dargestellt. Zwischen der Zugsteifigkeit und den beiden genannten Parametern besteht dabei unabhängig vom Laminataufbau ein linearer Zusammenhang. Als Ursache für die Steifigkeitsabnahme werden im Allgemeinen der durch das z-Pinning hervorgerufene reduzierte Faservolumengehalt sowie die Auslenkung der Fasern aus der Lastrichtung infolge der Faserwelligkeit und des Fasereinzugs genannt [3, 6, 39–41, 75]. Da die Abnahme des Zug-E-Moduls bei Verwendung von z-Pins mit sehr kleinen Durchmessern etwa im Bereich der durch den reduzierten FVG erwarteten Steifigkeit liegt, spielt dieser Mechanismus vor allem bei geringen Pindurchmessern eine entscheidende Rolle [6, 41]. Erst bei Steigerung des Pindurchmessers übersteigt die Steifigkeitsabnahme die Degradation, die der Abnahme des FVG zuzuordnen ist. Verantwortlich hierfür ist die mit steigendem Pindurchmesser zunehmende Auslenkung der Fasern aus der Lastrichtung, aufgrund dessen diese nicht mehr den vollen Anteil ihrer faserparallelen Steifigkeit zum E-Modul des Verbundes beitragen können. Unidirektional aufgebaute Lamine zeigen sich dabei besonders anfällig für Änderungen im Faserwinkel [40].

Mit Abnahme des Anteils lasttragender  $0^\circ$ -Fasern verringert sich der Einfluss der z-Pins auf die Zugsteifigkeit, sodass der Steifigkeitsverlust für Lamine mit beispielsweise quasi-isotropem oder biaxialem  $[\pm 45^\circ]$ -Aufbau deutlich weniger stark ausgeprägt ist [3].

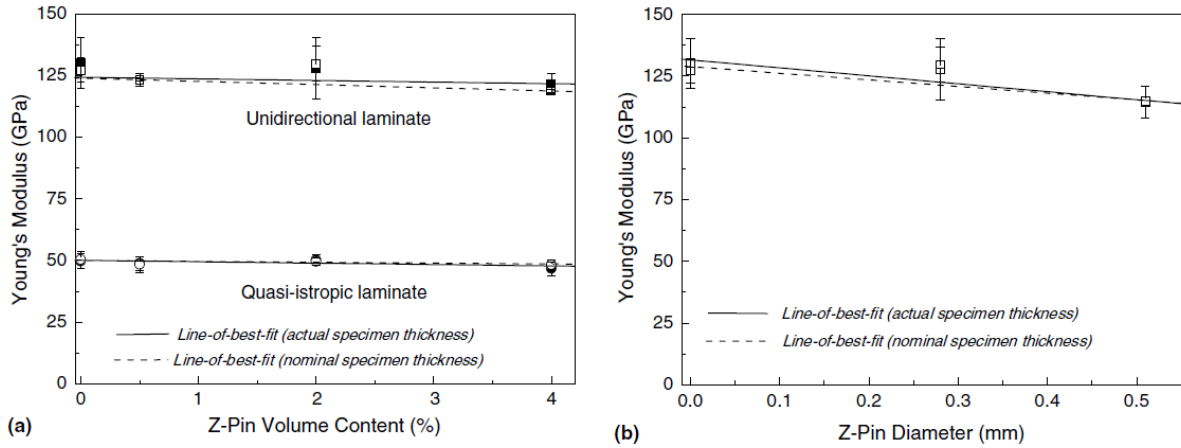


Abbildung 2.21: Einfluss von (a) Pingeht ( $\varnothing$  0,28 mm) und (b) Durchmesser kreisrunder z-Pins (2,0 %) auf die Zugsteifigkeit von CFK-Laminaten [41]

Verglichen mit der Zugsteifigkeit übt das z-Pinning einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Zugfestigkeit von FKV-Werkstoffen aus. Abbildung 2.22.a zeigt die von Mouritz und Chang [39] ermittelte Zugfestigkeit verpinnter CFK-Prüfkörper in Abhängigkeit vom Pingeht für unterschiedliche Laminataufbauten. Analog zur Zugsteifigkeit nimmt die Zugfestigkeit unabhängig vom Laminataufbau mit zunehmendem Pingeht linear ab, wobei auch hier unidirektional aufgebaute Lamine die größte Degradation erfahren. Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Blick auf die in Abbildung 2.22.b dargestellte Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Pindurchmesser. Bis zu einem Pindurchmesser von 0,5 mm stellt sich hier ebenfalls ein linearer Zusammenhang ein. Weiterführende Untersuchungen von Chang et al. [41] zeigen jedoch, dass diese Linearität mit weiter steigendem Pindurchmesser verloren geht und sich die Zugfestigkeit asymptotisch einem unteren Grenzwert annähert. Im Zusammenhang mit der Degradation der Zugfestigkeit werden in den relevanten wissenschaftlichen Veröffentlichungen ebenfalls der reduzierte Faservolumengehalt sowie die aus dem Fasereinzug resultierenden Faserbrüche als Ursachen genannt [40, 41, 75].

Im Vergleich zur Steifigkeit spielen Faserbrüche bei der Reduktion der Zugfestigkeit von verpinnten FKV eine bedeutendere Rolle. Um festigkeitsmindernde Schwachstellen innerhalb eines FKV-Laminats zu erzeugen, genügt nach Schätzungen von Ibnabdeljalil und Curtin [76] bereits eine geringe Anzahl gebrochener Fasern (ca. 5 bis 50). Aufgrund der bei der z-Pin-Einbringung entstehenden Faserbrüche im Laminat versagen die intakten Fasern in unmittelbarer Umgebung dieser Schwachstellen unter Zugbelastung bereits bei geringeren Spannungen und leiten damit ein Versagen der gesamten Struktur ein [75].

Eine Erhöhung des Pindurchmessers sowie eine Erhöhung des Pingehalts führen daher, aufgrund der größeren Anzahl gebrochener Fasern im Werkstoff, folgerichtig zu einer weiteren Abnahme der Zugfestigkeit.

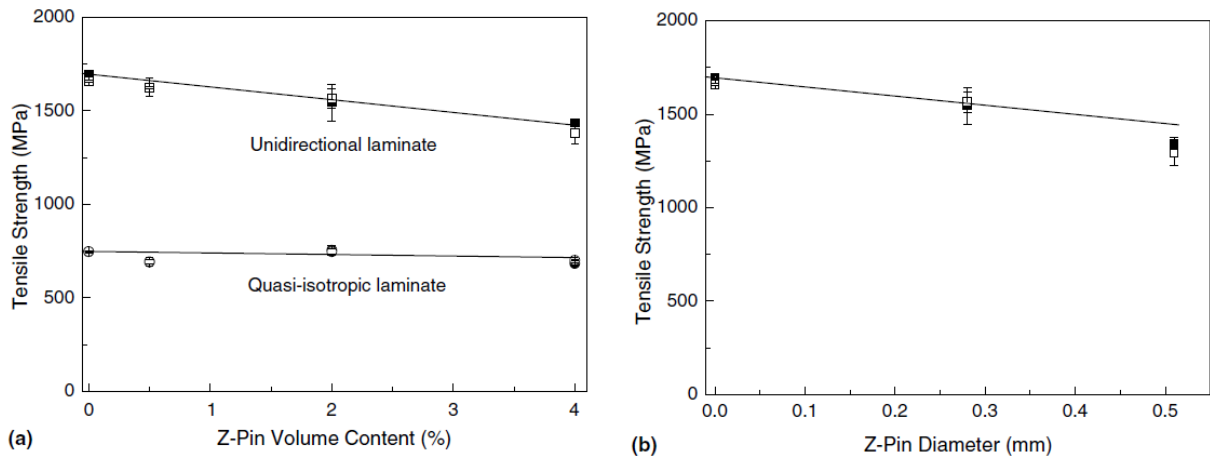


Abbildung 2.22: Einfluss von (a) Pingehalt ( $\varnothing$  0,28 mm) und (b) Durchmesser kreisrunder z-Pins (2,0 %) auf die Zugfestigkeit von CFK-Laminaten [41]

Neben der Zugfestigkeit und -steifigkeit wird auch die Lebensdauer und das Ermüdungsverhalten von FKV unter schwingender Beanspruchung durch den Einsatz von z-Pins signifikant beeinflusst. In Abbildung 2.23 sind die von Chang et al. [6, 41] ermittelten Lebensdauerkurven für unverpinnte und verpinnte Laminates mit unidirektionalem und quasi-isotropem Laminataufbau dargestellt. In der einfach logarithmischen Darstellung verhalten sich die Kurven nach Chang et al. über den gesamten Lastwechselzahlbereich linear. Wie für Faserverbundwerkstoffe üblich zeigen unverpinnte Proben für beide Laminataufbauten lediglich geringe Ermüdungserscheinungen. Im Gegensatz dazu führt eine translaminare Verstärkung durch z-Pins zu einer gesteigerten Anfälligkeit von FKV-Laminaten gegenüber einer schwingenden Beanspruchung. Mit zunehmendem Pingehalt findet dabei eine Verschiebung der aufgenommenen Lebensdauerkurven in Richtung niedrigerer Spannungsniveaus statt, welche teilweise mit der zuvor beschriebenen Reduzierung der Zugfestigkeit begründet wird. Die durch den Einsatz von z-Pins hervorgerufene stärkere Neigung der Lebensdauerkurven, deutet jedoch zusätzlich auf ein im Beisein von z-Pins beschleunigtes Schädigungswachstum oder einen geänderten Schädigungsmechanismus innerhalb des Laminats hin [6, 41]. Eine ausführliche Untersuchung der Ermüdungsmechanismen von z-Pin-verstärkten FKV ist bisher nicht bekannt. Chang et al. [41] vermuten jedoch auch hier einen Zusammenhang zwischen der Faserwelligkeit und den Faserbrüchen in verpinnten Laminaten und der erhöhten Anfälligkeit der Proben gegenüber einer schwingenden Beanspruchung.

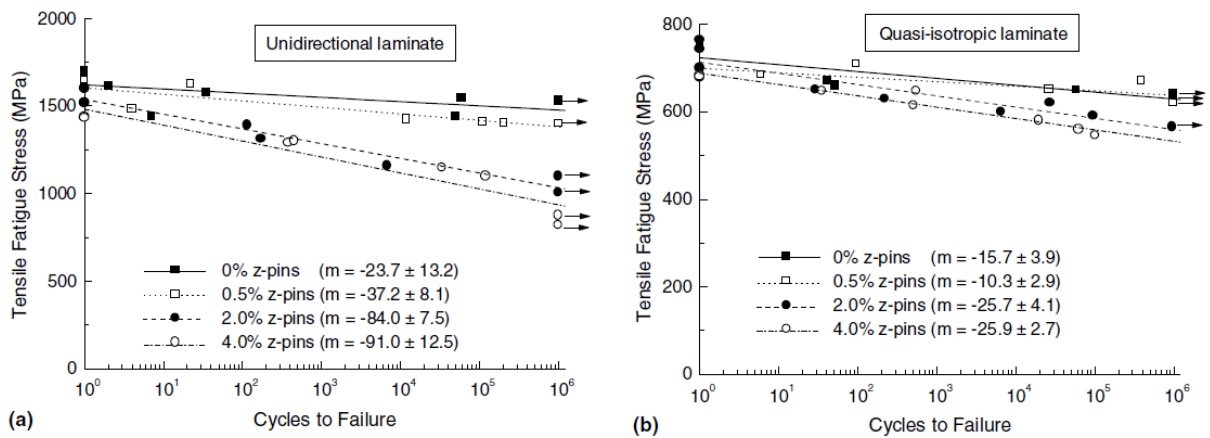


Abbildung 2.23: Lebensdauerkurven (a) unidirektionaler und (b) quasi-isotroper Laminate unter schwingender Zugbeanspruchung in Abhängigkeit vom Volumen-gehalt kreisrunder z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm [41]

### 2.5.5 Drucksteifigkeit und -festigkeit

Im Vergleich zu den Zugeigenschaften sind die Druckeigenschaften z-Pin-verstärkter FKV-Laminate deutlich weniger ausführlich untersucht worden. Die bisher veröffentlichten Untersuchungen zeigen jedoch, dass auch die mechanischen Druckeigenschaften durch das Einbringen von z-Pins in den Werkstoff signifikant beeinflusst werden. Abbildung 2.24 zeigt dazu den von Mouritz [5] ermittelten Einfluss einer z-Pin-Verstärkung auf die Drucksteifigkeit unidirektionaler FKV. Mit steigendem Pindurchmesser und Pingeht nimmt die Drucksteifigkeit linear ab. In zahlreichen experimentellen und numerischen Untersuchungen wurden dabei vor allem die Reduzierung des Faservolumengehalts sowie die Faserwelligkeit im Laminat als Ursache identifiziert [5, 37, 74, 77–79].

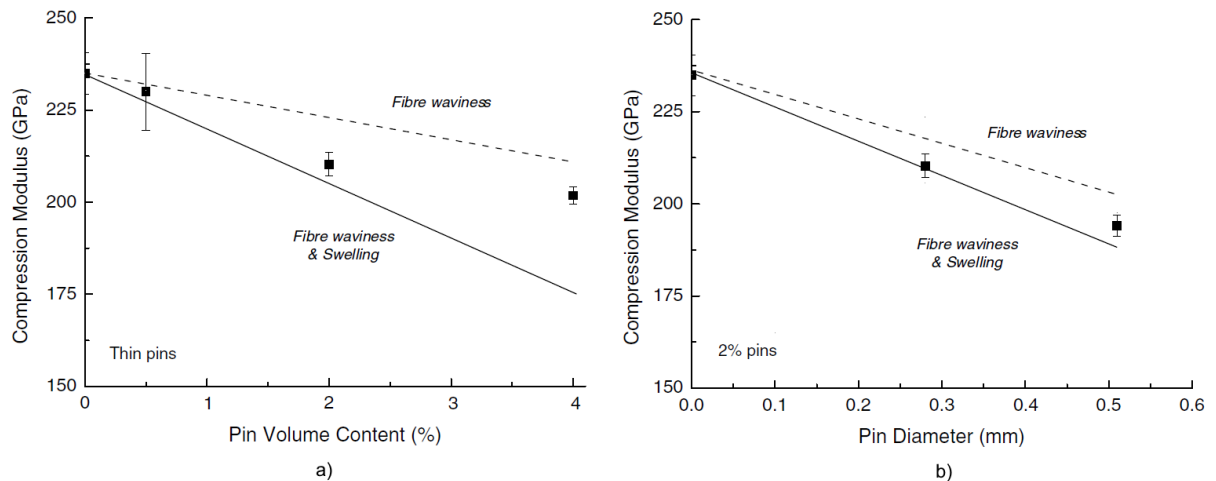


Abbildung 2.24: Einfluss von (a) Pingeht ( $\varnothing$  0,28 mm) und (b) Pindurchmesser auf die Drucksteifigkeit von unidirektionalen CFK-Laminaten [5]



Neben der Drucksteifigkeit wird zusätzlich die Druckfestigkeit durch die Einbringung von z-Pins in den Werkstoff beeinflusst. Die Abhängigkeit der experimentell ermittelten Druckfestigkeit vom Pingealt und dem Pindurchmesser ist in Abbildung 2.25 dargestellt. Die Druckfestigkeit nimmt dabei ebenfalls sowohl mit steigendem Pindurchmesser als auch mit zunehmendem Pingealt linear ab. Anders als für die Zugfestigkeit beschrieben, spielen die bei der Pineinbringung entstehenden Faserbrüche hierbei lediglich eine untergeordnete Rolle. Vielmehr führt die Faserwelligkeit zu einer Reduzierung der Knickspannung der Verstärkungsfasern in unmittelbarer Umgebung der Pins [5]. Dies führt mit steigender Belastung zur Ausbildung von Knickbändern in der Faserwelligkeitszone des Laminats, welche sich im Werkstoff ausbreiten und letztendlich zum Versagen führen [37].

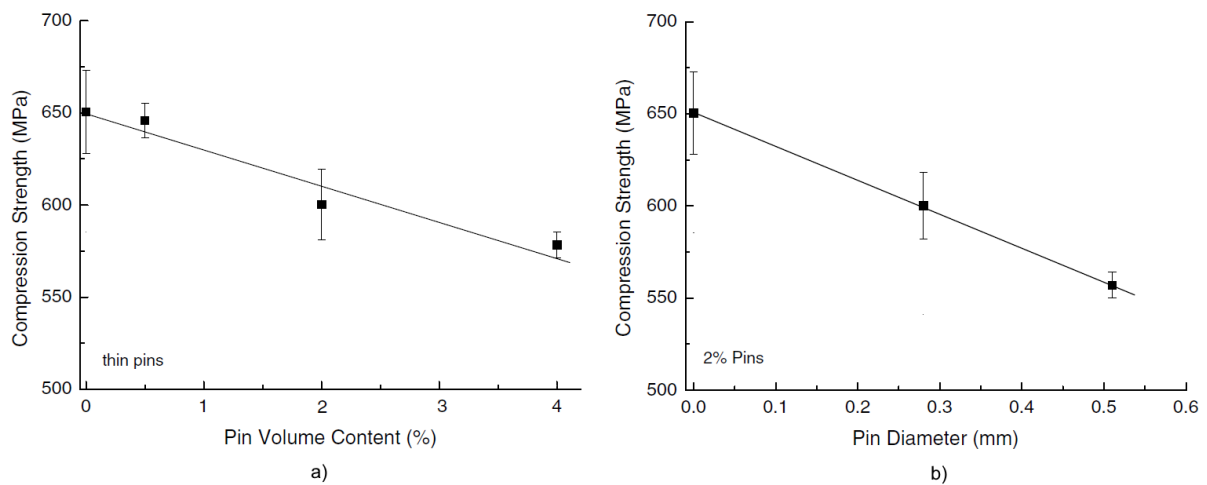


Abbildung 2.25: Einfluss von (a) Pingealt ( $\varnothing$  0,28 mm) und (b) Pindurchmesser auf die Druckfestigkeit von unidirektionalen CFK-Laminaten [5]

Wie stark die mechanischen Druckeigenschaften verpinnter FKV-Lamine beeinflusst werden, hängt neben den Parametern der z-Pin-Verstärkung ebenfalls vom verwendeten Laminataufbau ab. In Abbildung 2.26 ist die Steifigkeits- bzw. Festigkeitsreduktion für vier unterschiedliche Laminataufbauten dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Degradation der mechanischen Druckeigenschaften, analog den Beobachtungen zu den Zugeigenschaften, mit steigender Anzahl lasttragender  $0^\circ$ -Fasern zunimmt.

Auch die Ermüdungsfestigkeit von Faserverbundkunststoffen unter Druckbelastung wird durch das Einbringen von z-Pins negativ beeinflusst. Abbildung 2.27 zeigt die von Mouritz [5] ermittelten Lebensdauerkurven für z-Pin-verstärkte unidirektionale Lamine in Abhängigkeit vom Pingealt bzw. Pindurchmesser. Dabei verhalten sich die Lebensdauerkurven, analog den Erkenntnissen zur Zugbelastung, in der einfach logarithmischen Darstellung linear über den gesamten Lastwechselzahlbereich. Unverpinnte Lamine zeigen hierbei lediglich geringe Ermüdungserscheinungen. Sowohl mit steigendem Pingealt als

auch Pindurchmesser nimmt die Ermüdungsfestigkeit der getesteten Prüfkörper jedoch signifikant ab. Eine Untersuchung zum Einfluss der genannten Parameter auf die Neigung der Lebensdauerkurven und damit die Schädigungsausbreitung im Werkstoff ist bisher nicht bekannt.

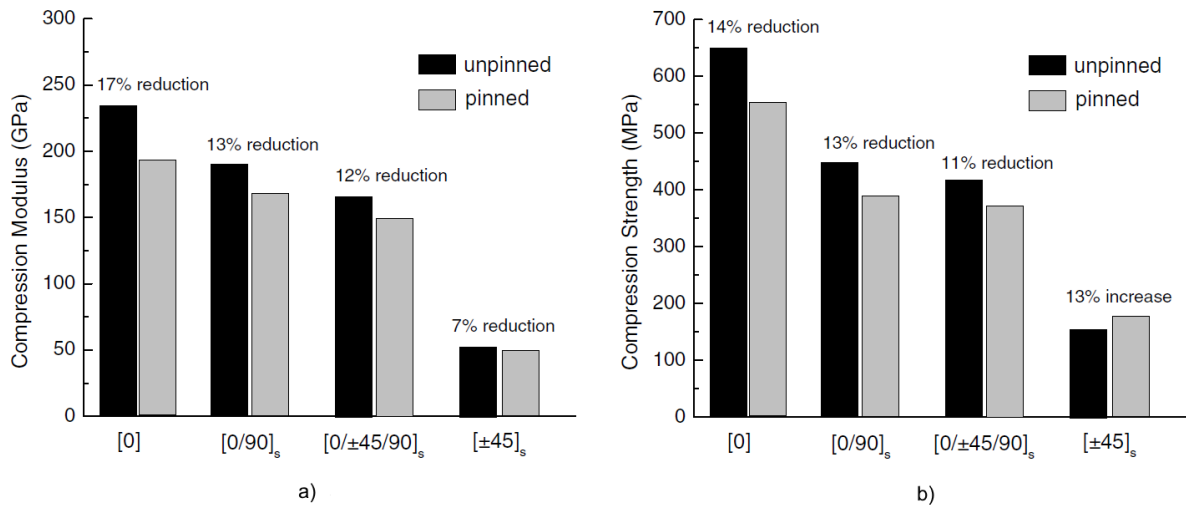


Abbildung 2.26: Degradation der (a) Drucksteifigkeit und (b) -festigkeit z-Pin-verstärkter Lamine mit unterschiedlichem Laminataufbau, ermittelt für kreisrunde z-Pins ( $\varnothing$  0,51 mm) mit einem Pingegehalt von 2,0 % [5]

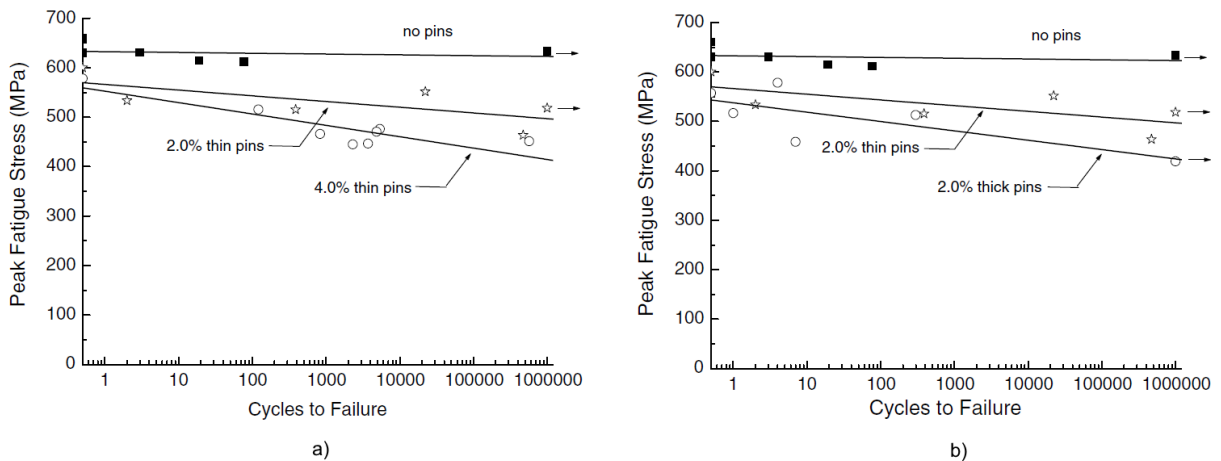


Abbildung 2.27: Lebensdauerkurven unidirektionaler Lamine unter schwingender Druckbeanspruchung in Abhängigkeit vom (a) Pingegehalt ( $\varnothing$  0,28 mm) und (b) Pindurchmesser (thin:  $\varnothing$  0,28 mm bzw. thick:  $\varnothing$  0,51 mm) [5]

## 2.6 Numerische Untersuchungen an z-Pin-verstärkten Faserverbundwerkstoffen

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen werden bereits seit einigen Jahren numerische Verfahren in Form der Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt, um das Verständnis der Kraftübertragung zwischen Pin und Laminat sowie der Versagensmechanismen in der Grenzfläche zu vertiefen. Dabei werden die Werkstoffkennwerte, die der FE-Simulation zugrunde gelegt werden, bis heute in der Regel empirisch durch den Abgleich der Simulations- mit den Versuchsergebnissen bestimmt. Mittelfristiges Ziel der Bemühungen um die numerische Berechnung z-Pin-verstärkter FKV muss jedoch die Substitution der experimentellen Untersuchungen sein, die bis heute zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter FKV unverzichtbar sind, aber oftmals einen hohen Kosten- und Zeitaufwand bedeuten.

FE-Modelle können prinzipiell zur Vorhersage des Materialverhaltens unter nahezu allen in Verbindung mit z-Pins relevanten Beanspruchungszuständen eingesetzt werden. An numerischen Modellen der entsprechenden Prüfkörper wurde in der Vergangenheit beispielsweise der Einfluss von z-Pins auf das Rissfortschrittsverhalten unter Mode-I- [56, 57, 59, 80–83], Mode-II- [63, 81, 83], Mixed-Mode- [81] oder Impact-Beanspruchung [84] simuliert. Oftmals ist es jedoch ausreichend das Verhalten z-Pin-verstärkter Faserverbundwerkstoffe an kleineren, repräsentativen Einheiten des gesamten Prüfkörpers bzw. Bauteils zu untersuchen. Diese sogenannten Einheitszellenmodelle werden üblicherweise verwendet, um den Einfluss von z-Pins auf die mechanischen in-plane-Eigenschaften zu ermitteln [37, 79, 85, 86], die Brückenkraftantwort eines Einzelpins im Pullout-Versuch zu berechnen [11, 12, 87–89] oder die Vorgänge in der Pin-Laminat-Grenzfläche während des Abkühlens im Anschluss an die Heißaushärtung zu simulieren [10–13].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der Einfluss der Pingeometrie auf die Grenzflächenspannungen, die sich während der Abkühlung von der Aushärtetemperatur zwischen Pin und Laminat ausbilden, numerisch untersucht werden. Der Inhalt des folgenden Abschnitts beschränkt sich daher auf die Beschreibung der Einheitszelle als repräsentatives Element eines z-Pin-verstärkten Laminats sowie der zur Darstellung der Pin-Laminat-Grenzfläche verwendeten Kohäsivelemente und deren Kohäsivgesetze, die das Verhalten der Grenzfläche unter Lasteinwirkung beschreiben.

### 2.6.1 Einheitszellenmodelle

Vereinfachend angenommen besteht ein z-Pin-verstärkter Verbundwerkstoff aus sich periodisch wiederholenden Volumenelementen mit identischem Strukturaufbau und mechanischen Eigenschaften. Im Rahmen einer FE-Analyse erlaubt diese Annahme die Einteilung einer FKV-Struktur in repräsentative Volumenelemente, sogenannte Einheitszellen. Die Nutzung von Einheitszellen ermöglicht dabei die Simulation komplexer Beanspruchungszustände unter Berücksichtigung einer hohen Detailtreue und Nutzung einer feinen Vernetzung bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand.

Eine Einheitszelle ist als kleinste wiederkehrende Raumeinheit innerhalb einer Struktur definiert [79]. Übertragen auf z-Pin-verstärkte Laminats besteht diese demnach aus einem einzelnen z-Pin und dem in unmittelbarer Umgebung befindlichen Grundlaminat, dessen Mikrostruktur durch die Einbringung des Pins beeinflusst wurde. Wie in Abschnitt 2.4 dieser Arbeit beschrieben, weist ein z-Pin-verstärkter Faserverbundwerkstoff in unmittelbarer Umgebung der z-Pins eine heterogene Mikrostruktur aus Grundlaminat, z-Pins und Reinharzzone auf, die es bei der Modellierung einer entsprechenden Einheitszelle zu berücksichtigen gilt. Beispielhafte Einheitszellen eines verpinnten FKV-Laminats sind in Abbildung 2.28 für unterschiedliche Laminataufbauten schematisch dargestellt.

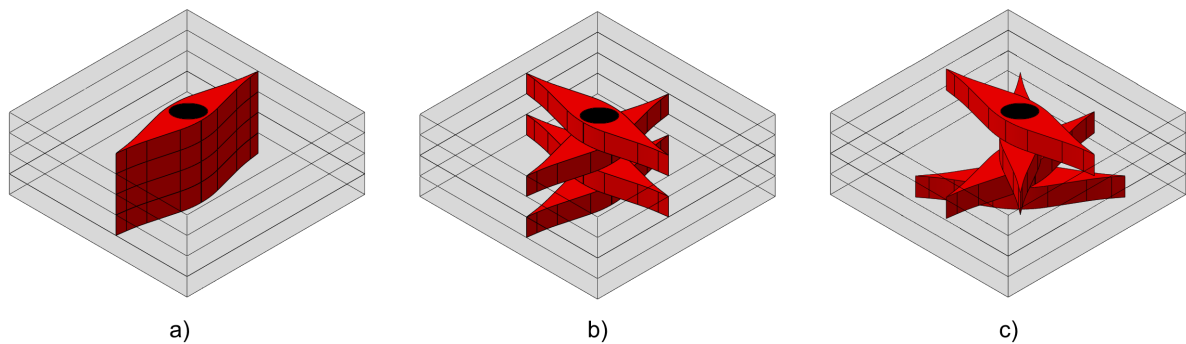


Abbildung 2.28: Schematische Darstellung von Einheitszellenmodellen z-Pin-verstärkter Laminats mit (a) unidirektionalem, (b) bidirektionalem und (c) quasi-isotropem Lagenaufbau

Z-Pin-verstärkte Laminats mit unterschiedlichen Orientierungen ihrer Faserschichten weisen dabei in der Grenzfläche benachbarter Lagen harte Übergänge zwischen den jeweiligen harzreichen Zonen und dem Grundlaminat auf. Die Vermeidung von Unstetigkeiten des FE-Netzes im Bereich der Übergänge zwischen zwei Laminatschichten stellt daher bei der Vernetzung der Einheitszellenmodelle eine besondere Herausforderung dar. Um die Netzkompatibilität zwischen zwei benachbarten Lagen eines z-Pin-verstärkten Laminats sicherzustellen, wurde daher von Dickinson et al. [86] ein zweidimensionales, sternenfö-

miges FE-Netz eingeführt, welches durch Extrusion in z-Richtung in der Einheitszelle unabhängig von der Lagenorientierung eine einheitliche Vernetzung, bestehend aus 3D-Volumenelementen ermöglicht. In Abbildung 2.29 ist dazu beispielhaft ein FE-Netz für ein Einheitszellenmodell mit kreisrundem z-Pin und harzreicher Zone für bis zu vier unterschiedliche Faserorientierungen innerhalb des Laminats dargestellt.

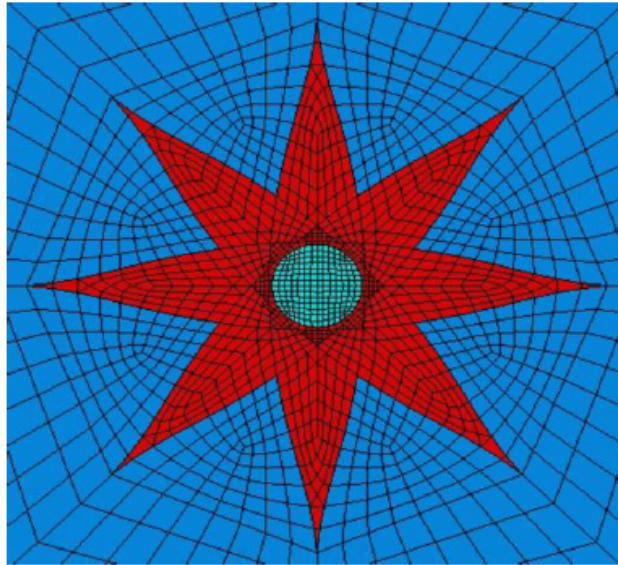


Abbildung 2.29: Darstellung eines typischen sternenförmigen FE-Netzes zur Vernetzung von Einheitszellenmodellen mit mehreren Faserorientierungen [12]

### 2.6.2 Kohäsivelemente

Zur Darstellung der Grenzfläche zwischen Pin und Laminat in Einheitszellenmodellen kommen seit einiger Zeit vermehrt sogenannte Kohäsivelemente zum Einsatz. Die mechanische Antwort dieser Elemente unterliegt dabei einem Kohäsivgesetz, welches die im Element auftretende Spannung in Relation zur vorliegenden Knotenpunktverschiebung unter Mode-I- bzw. Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung setzt. In Verbindung mit der Modellierung der Pin-Matrix-Grenzfläche wird dabei in der Regel auf ein bi-lineares Kohäsivgesetz, wie es beispielhaft in Abbildung 2.30 dargestellt ist, zurückgegriffen. Dieses berücksichtigt nach Harper und Hallett [90] einen anfänglichen, über die Steifigkeit  $K$  definierten elastischen Bereich bis zum Erreichen einer Maximalspannung  $\sigma_{max}$ , welche die maximale Beanspruchbarkeit des Kohäsivelements widerspiegelt und eine anschließende Erweichungsphase bis zum vollständigen Versagen des Elements bei einer Rissöffnungsverschiebung von  $\delta_0$ . Die von der Kurve umschlossene Fläche spiegelt dabei die Risszähigkeit des Werkstoffs wider.

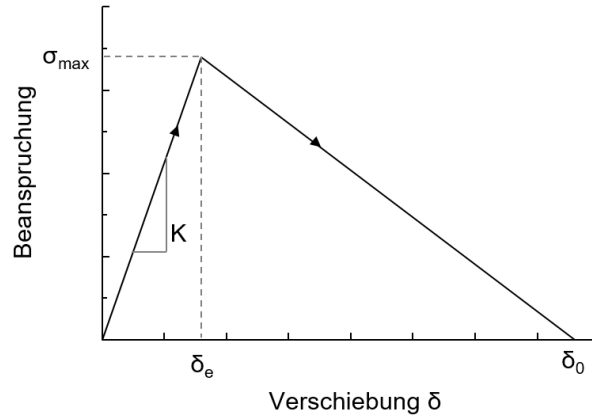


Abbildung 2.30: Darstellung eines typischen bi-linearen Kohäsivgesetzes

Die beschriebenen Kohäsivgesetze geben die mechanische Antwort der Grenzflächenelemente unter reiner Mode-I- bzw. Mode-II-Beanspruchung wieder. Unterliegen die Knotenpunkte der Kohäsivelemente jedoch einer Mixed-Mode-Rissöffnungsverschiebung werden geeignete Kriterien benötigt, die das Erreichen der Maximalspannung sowie das Versagen des Elements in Abhängigkeit vom Beanspruchungszustand und den Materialeigenschaften definieren. Die maximal ertragbare Spannung in der Grenzfläche ist dabei mit Erfüllen des in Formel 2.2 angegebenen quadratischen Kriteriums der Fehlerinitiierung erreicht [81].

$$\sqrt{\left(\frac{\max(\sigma_I, 0)}{\sigma_{I,max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{II,max}}\right)^2} = 1 \quad (2.2)$$

Dabei sind  $\sigma_I$  und  $\sigma_{II}$  die im Element herrschenden Spannungen infolge von Mode-I- bzw. Mode-II-Rissöffnungsverschiebungen sowie  $\sigma_{I,max}$  und  $\sigma_{II,max}$  die jeweiligen Maximalspannungen des dazugehörigen Kohäsivgesetzes.

Das Versagen eines Kohäsivelements unter Mixed-Mode-Beanspruchung bei ausreichend großer Rissöffnungsverschiebung tritt ein, sobald Gleichung 2.3 erfüllt ist [84].

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta = 1 \quad (2.3)$$

Dabei sind  $G_I$  und  $G_{II}$  die bei erfolgter Rissöffnungsverschiebung ermittelten Energiefreisetzungsrate infolge von Mode-I- bzw. Mode-II-Beanspruchungen sowie  $G_{IC}$  und  $G_{IIC}$  die dazugehörigen kritischen Energiefreisetzungsrate des Werkstoffs. Der Parameter  $\beta \in (1,0-2,0)$  wird dabei häufig empirisch bestimmt [90].

### 2.7 Anwendungsbeispiele für z-Pin-Verstärkungen

Trotz der beschriebenen Steigerung der bruchmechanischen Eigenschaften und der Schadenstoleranz von FKV-Werkstoffen ist der konkrete Einsatz des z-Pinning-Verfahrens in der Industrie derzeit noch auf wenige Anwendungen begrenzt. Als Gründe hierfür werden im Allgemeinen ein bis heute fehlendes, kostengünstiges und automatisiertes Einbringverfahren sowie die Unsicherheiten bezüglich der Degradation der in-plane-Eigenschaften und des Langzeitverhaltens z-Pin-verstärkter Strukturen genannt [3, 5]. Die bisher bekannten Anwendungen von z-Pins beschränken sich daher vor allem auf nicht tragende Bauteile, die keine Zertifizierung hinsichtlich ihrer Schadenstoleranzeigenschaften aufweisen müssen [74] sowie Industriezweige, in denen die Fertigungskosten eine untergeordnete Rolle spielen.

Eines der wenigen Beispiele für den Einsatz von z-Pins ist deren Anwendung als Verstärkungselement in Crashelementen von Formel-1-Fahrzeugen. Dabei erfolgte der erste Einsatz in den Überrollbügeln durch Jaguar Racing bereits im Jahr 2000 [91]. Weitere im Zusammenhang mit dem z-Pinning-Verfahren oft genannte Anwendungsbeispiele sind im Bereich der militärischen Luftfahrt zu finden. Aufgrund der festigkeitssteigernden Eigenschaften von z-Pins in FKV-Fügeverbindungen [92–96], kommen diese beispielsweise an den Lufteinlasskanälen der F/A-18E/F Superhornet der US-Luftwaffe als Verbindung zwischen den Hutversteifungselementen und der FKV-Außenhaut zum Einsatz. Dort ersetzen die Pins die zuvor verwendeten Titanverbindungselemente und führen so zu einer Gewichtsreduzierung von 17 kg bei gleichzeitiger Senkung der Kosten um 83.000\$ pro Flugzeug [77].

## **3 Verwendete Materialien und Untersuchungsmethoden**

Die Eigenschaften z-Pin verstärkter Faserverbundkunststoffe sind stark von den eingesetzten Werkstoffen, dem Prüfkörperaufbau und den Versuchsparametern abhängig. Um die erzielten Versuchsergebnisse korrekt in den wissenschaftlichen Kontext einordnen zu können, ist daher zunächst die Charakterisierung der verwendeten Halbzeuge sowie die Beschreibung der Prüfkörper- und z-Pin-Herstellung Gegenstand des folgenden Kapitels. Anschließend werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Untersuchungsmethoden vorgestellt und das Vorgehen zur Auswertung der Versuchsergebnisse beschrieben.

### **3.1 Charakterisierung der verwendeten Materialien**

#### **3.1.1 Prepreghalbzeug**

Für die Herstellung der in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Prüfkörper wurde auf ein luftfahrtzugelassenes Prepreg-System (Hexply M21/34%/UD194/IM7-12K) der Firma Hexcel Composites zurückgegriffen. Dieses besteht aus einem heißaushärtenden Epoxidharz-Matrixsystem (HexPly 108) und einer unidirektionalen Kohlenstofffaserverstärkung aus IM7-Fasern. Der theoretische Faservolumengehalt beträgt 59,2 %. Mit dem angegebenen Flächengewicht des Prepreg-Systems von 294 g/cm<sup>2</sup> ergibt sich eine theoretische Lagendicke des ausgehärteten Prepregs von 0,184 mm. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften der Einzelkomponenten sowie des Verbundmaterials sind in Tabelle 3.1 angegeben.



Tabelle 3.1: Mechanische Kennwerte des eingesetzten Prepregsystems in Faserrichtung

Komponente	Bezeichnung	Zugfestigkeit	Zugmodul	Bruchdehnung
Matrix	Hexply 108	59 MPa	3,54 GPa	1,7 %
Faser	HexTow IM7	5654 MPa	276 GPa	1,9 %
Prepreg	HexPly M21	2860 MPa	160 GPa	1,7 %

Der laut Datenblatt vorgeschlagene Autoklavprozess ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Aushärtung des Prepregmaterials erfolgte im Autoklaven bei  $180^{\circ}\text{C}$  über einen Zeitraum von 150 Minuten und einem Aushärtedruck von 7 bar. Die tatsächliche Verweildauer auf der Aushärtetemperatur wurde damit gegenüber der im Datenblatt angegebenen Halte-dauer um 30 min erhöht, um einen möglichst hohen Aushärtegrad des Matrixmaterials zu erreichen.

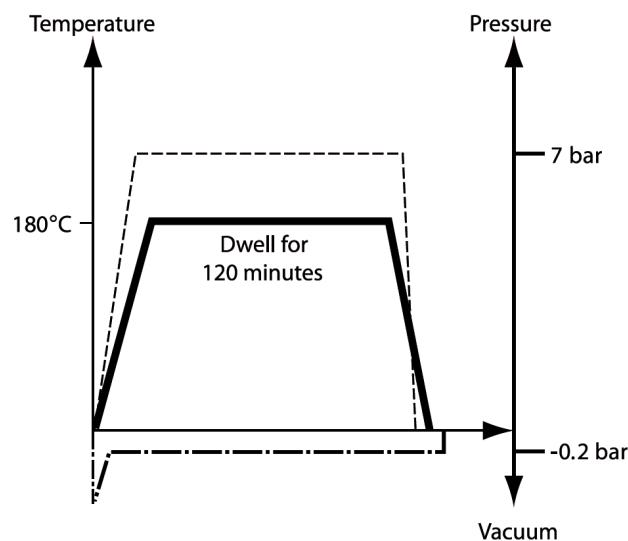


Abbildung 3.1: Aushärtezyklus für das verwendete Prepregsystem laut Datenblatt [97]

#### 3.1.2 z-Pins

Als Ausgangshalbzeug zur Herstellung der kreisrunden und rechteckigen z-Pins wurden von der Firma van Dijk Pultrusion Products hergestellte, pultrudierte CFK-Stäbe verwendet. Die Faserverstärkung der Stäbe bestand aus Kohlenstofffasern (Torayca T300) mit einem FVG von ca. 60 %. Da die Aushärtung der Prüfkörper bei erhöhter Temperatur stattfand, wurde als Matrixsystem ein hoch temperaturbeständiges Bismaleimid-Harz (BMI) (CYCOM 5250-4) ausgewählt. Der Nenndurchmesser der CFK-Stäbe für die kreisrunden z-Pins betrug 0,5 mm. Um die Ergebnisse unterschiedlicher Pingeometrien vergleichen zu können, ist es zweckmäßig die Größe der Querschnittsflächen möglichst

### 3.1 Charakterisierung der verwendeten Materialien

identisch zu wählen. Die Abmessungen der Stäbe mit Rechteckquerschnitt betrugen daher  $b_{Pin} \times h_{Pin} = 0,3 \times 0,7$  mm. Durch die Wahl der Pinabmessungen sowie der verwendeten Materialien ist darüber hinaus die Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse mit den in Kapitel 2 dieser Arbeit beschriebenen wissenschaftlichen Untersuchungen gewährleistet.

Aufgrund von Fertigungstoleranzen entsprach der tatsächliche Querschnitt der Pins nicht exakt den oben angegebenen Abmessungen. Aus diesem Grund wurden die Stäbe vor der Weiterverarbeitung vermessen und die Abweichungen vom Nennmaß bei der Prüfkörperherstellung berücksichtigt. Eine Gegenüberstellung der tatsächlichen Querschnittsabmessungen mit ihren Nennwerten liefert Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung von Nennmaß und tatsächlichen Abmessungen der verwendeten kreisrunden und rechteckigen z-Pins

	Kreisrunde Pins		Rechteckige Pins	
	$d_{Pin}$ [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]	$b_{Pin} \times h_{Pin}$ [mm]	$A_{\square}$ [mm <sup>2</sup> ]
Nennmaß	0,50	0,20	$0,30 \times 0,70$	0,21
Messwert	0,48	0,18	$0,31 \times 0,64$	0,20

Die Weiterverarbeitung der CFK-Stäbe erfolgte durch die Firma Staedtler + Uhl. Dabei wurden diese zunächst auf eine Länge von 15 mm gekürzt und anschließend an einem Ende gespitzt, um das Eindringen der Pins in den Werkstoff zu erleichtern und die Anzahl der Faserbrüche im Laminat zu minimieren. Die kreisrunden z-Pins wurden zu diesem Zweck umlaufend angeschliffen und eine kegelförmige Spitze mit einem Öffnungswinkel von 30° erzeugt. Durch das Anschleifen aller vier Seiten an einem Ende wurde für rechteckige z-Pins ebenfalls ein Spitzenöffnungswinkel von 30° realisiert. Mikroskopaufnahmen der verwendeten z-Pins sind für beide Pingeometrien in Abbildung 3.2 dargestellt.

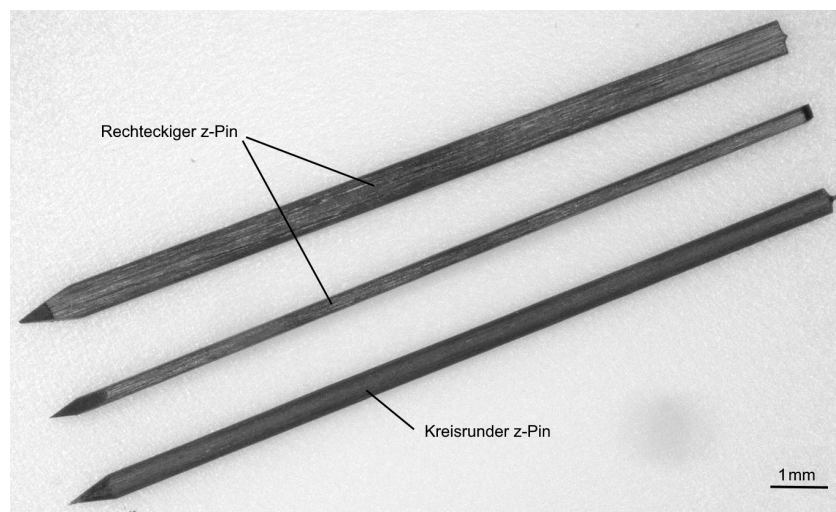


Abbildung 3.2: Aufnahme der verwendeten kreisrunden und rechteckigen z-Pins

## 3.2 Prüfkörperherstellung

Die Fertigung der in den experimentellen Untersuchungen benötigten Prüfkörper erfolgte in einem mehrstufigen Prozess. Dazu sind zunächst die benötigten z-Pin-Preforms mit den geforderten Pingegehalten hergestellt worden. Für die Herstellung dieser wurden, analog zu den kommerziell erhältlichen Preforms, zwei Schäume mit unterschiedlicher Dichte verwendet, von denen lediglich der obere während des Einbringprozesses kollabiert. Für den kompaktierbaren Teil der Preform wurde dabei auf einen geschlossenzelligen Polymethacrylimid (PMI)-Schaum (Rohacell 31 IG) mit einer Materialstärke von 12 mm zurückgegriffen. Den nicht kompaktierbaren Teil bildete ein weiterer PMI-Schaum (Rohacell 51 IG-F) mit einer höheren Steifigkeit und einer Dicke von 3 mm. Im Vorfeld der Preformherstellung wurden sämtliche z-Pins in einem Isopropanolbad gereinigt, um eventuelle Verschmutzungen zu entfernen und eine Beeinträchtigung der Haftung zwischen Pin und Laminat auszuschließen. Um die senkrechte Einbringung der z-Pins, den geforderten Pinabstand sowie deren Ausrichtung in der Pin-Preform sicherzustellen, wurden zwei dünne Aluminiumbleche, in die entsprechend der Pingeometrie kreisrunde bzw. rechteckige Löcher eingebracht wurden, in einem vertikalen Abstand von 5 mm zueinander auf den Preformschäumen platziert. Anschließend wurden die Pins per Hand in die Vorrichtung eingefädelt und mit einem Durchdrückwerkzeug in den Schaum getrieben. Mithilfe dieses Verfahrens wurden zunächst Preformplatten (310 mm × 310 mm) hergestellt, aus denen im Anschluss Streifen herausgearbeitet wurden, welche die vorgesehene Pinanzahl für die jeweiligen in den experimentellen Untersuchungen benötigten Prüfkörper beinhalteten.

Der Abstand, mit dem die Pins in die Preform und anschließend in das Laminat eingebracht wurden, richtete sich nach dem angestrebten Volumengehalt der Pins in den Prüfkörpern. Für rechteckige z-Pins betrug dieser unabhängig von ihrer Ausrichtung im Laminat 6,29 mm, 4,45 mm bzw. 3,15 mm für die Zielvolumengehalte von 0,5 %, 1,0 % und 2,0 %. Aufgrund der geringfügig unterschiedlichen Querschnittsfläche ergab sich für die kreisrunden Pins ein abweichender Abstand von 3,01 mm für den einzig untersuchten Pinge halt von 2,0 %.

Die Einbringung der z-Pins in das Laminat erfolgte in einem eigens dafür hergestellten Halterahmen (Abbildung 3.3), der sowohl die möglichst exakte Ausrichtung der einzelnen Prepreglagen beim Aufbau des Laminats als auch die Einhaltung der gewünschten Position der z-Pin-Preforms während der Pin-Einbringung sicherstellen sollte. Dazu wurde zunächst das Laminat (300 mm × 300 mm) gemäß der geforderten Lagenorientierung aufgebaut, eine Schablone auf dem Rahmen platziert und die im Vorfeld hergestellten

### 3.2 Prüfkörperherstellung

Preforms in diese eingelegt. Die Einbringung der z-Pins erfolgte mithilfe einer Ultraschall-schweißanlage (Branson 921 AE) im UAZ-Prozess. Dabei wurde sichergestellt, dass die Spitzen der Pins nach erfolgter Insertion vollständig auf der Unterseite des Laminats ausgetreten waren. Auf diese Weise sollte ein Einfluss der Pinspitzen, die sich für kreisrunde und rechteckige Pins in ihrer Form unterscheiden, auf die Versuchsergebnisse ausgeschlossen werden. Die bei der ultraschallgestützten Einbringung der z-Pins verwendeten Geräteeinstellungen sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Verwendete Geräteeinstellungen für die ultraschallgestützte Pineinbringung

Druck	Vorschub	Trigger	Sonotrode	Amplitude	Frequenz
0,8 bar	12	1	3:1	50 %	20 kHz

Die Autoklavaushärtung der gefertigten Prüfkörperlamine erfolgte gemäß der in Abschnitt 3.1.1 vorgestellten Aushärteparameter des Prepregs, bei der Iuratec AG in Rostock. Nach dem Entformen des Vakuumaufbaus wurden die Prüfkörper in einem letzten Arbeitsschritt unter Verwendung von diamantverzahnten Fräswerkzeugen aus den Laminatplatten herausgearbeitet und für eine eventuell folgende Nachbehandlung wie das Applizieren von Krafteinleitungselementen vorbereitet.

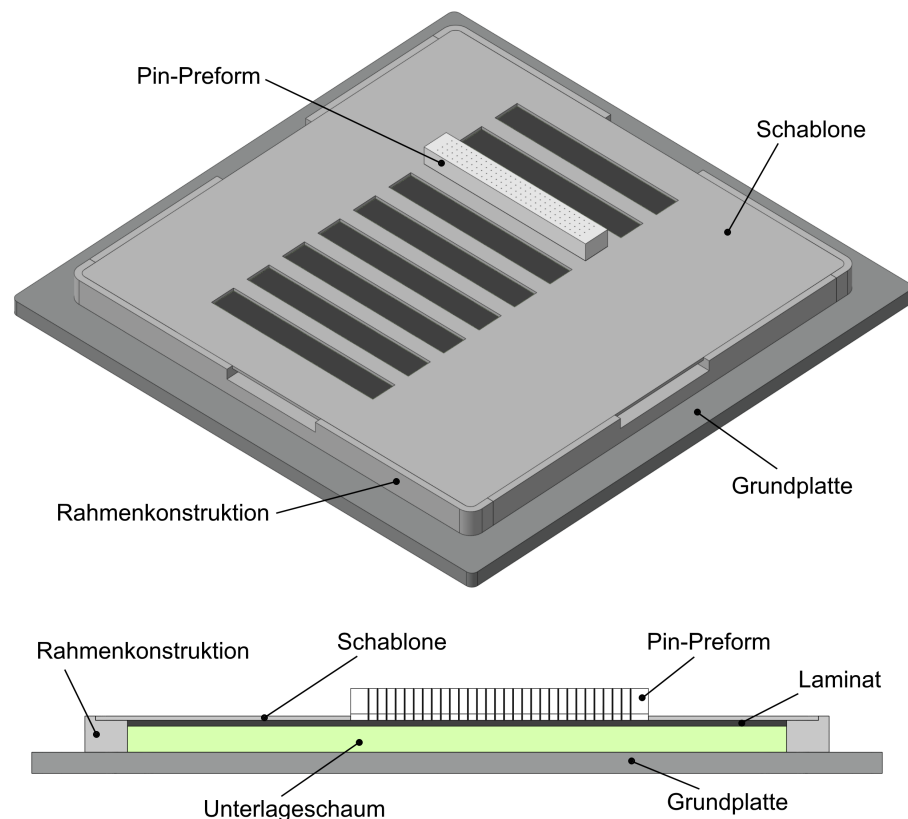


Abbildung 3.3: Darstellung der Vorrichtung zur Herstellung der Prüfkörperlamine

## 3.3 Untersuchung der Mikrostruktur

Im Vorfeld der experimentellen Untersuchungen wurde zunächst die Mikrostruktur der hergestellten CFK-Prüfkörper mit kreisrunden und rechteckigen z-Pins untersucht. Ziel war die Erfassung eines möglichen Einflusses der Pin-Geometrie auf die resultierenden Inklinationswinkel der Pins, die entstehenden Faserumlenkungen und -brüche sowie die Pin-Laminat-Grenzfläche. Neben der Gegenüberstellung der durch die rechteckigen und kreisrunden z-Pins hervorgerufenen mikrostrukturellen Veränderungen stand dabei ebenso die Einordnung der erzielten Ergebnisse in den Kontext vergleichbarer externer Untersuchungen im Fokus. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der Mikrostrukturuntersuchungen eine zusätzliche Hilfestellung bei der Auswertung der experimentellen Versuche zu den mechanischen Kennwerten z-Pin-verstärkter FKV leisten. Die Beschreibung der dazu notwendigen Arbeitsschritte zur Probenherstellung sowie die genutzten Methoden zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Mikrostruktur sind Gegenstand des nachfolgenden Abschnitts der Arbeit.

Zur Ermittlung des Inklinationswinkels kreisrunder und rechteckiger z-Pins wurden die in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Pullout-Prüfkörper verwendet, da diese aufgrund ihrer hohen Prüfkörperdicke von 4,43 mm im Zusammenhang mit dem genutzten Messverfahren die geringste Anfälligkeit gegenüber Messfehlern aufweisen. Zur Messung des Pinwinkels wurden zunächst Bilder von beiden Seiten der Prüfkörper aufgenommen. Ein Halterahmen sorgte dabei für eine senkrechte Bildaufnahme in einem definierten Abstand von der Probe. Mithilfe der Bildverarbeitungssoftware ImageJ wurden die Abstände aller Pins zur Schnittkante der Probe in x- und y-Richtung gemessen. Aus der Differenz der Schnittkantenabstände zwischen Ober- und Unterseite der Probe konnten anschließend mithilfe der Gleichungen 3.1 und 3.2 die Inklinationswinkel  $\Phi_x$  und  $\Phi_y$  der Pins berechnet werden.

$$\Phi_x = \tan^{-1}((x_u - x_o)/t) \quad (3.1)$$

$$\Phi_y = \tan^{-1}((y_u - y_o)/t) \quad (3.2)$$

Dabei sind  $x_u$  und  $x_o$  die Kantenabstände der Pins in x-Richtung auf der Unter- bzw. Oberseite der Probe und analog  $y_u$  und  $y_o$  die Kantenabstände der Pins in y-Richtung auf der Unter- bzw. Oberseite der Probe sowie  $t$  die Prüfkörperdicke.

Der Gesamtinklinationswinkel  $\Phi$  berechnet sich gemäß Gleichung 2.1 aus Abschnitt 2.4.3 dieser Arbeit. Untersucht wurden Prüfkörper mit kreisrunden und rechteckigen z-Pins in unidirektionalen bzw. quasi-isotropen Prüfkörpern. In UD-Laminaten wurde zusätzlich zwischen längs und quer ausgerichteten rechteckigen Pins unterschieden. Für jede Versuchsreihe wurden sieben Prüfkörper untersucht.

Alle weiteren zuvor genannten Mikrostrukturuntersuchungen wurden anhand geeigneter Schliffproben unter dem Lichtmikroskop getätigt. Dafür wurden die Proben zunächst zur besseren Handhabung im Schleif- und Polierprozess in eine Formmasse, bestehend aus einem 2-Komponenten Acrylatkunststoff, eingebettet. Die Herstellung der Schliffproben erfolgte mithilfe eines Schleif- und Poliergerätes (DP-U2) der Firma Struers. Dabei wurden die Proben in einem ersten Schritt unter Wasserschmierung stufenweise mit feiner werdender Körnung soweit geschliffen, bis die gewünschte Schlifftiefe erreicht war. Anschließend erfolgte das Polieren der Proben unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Diamantsuspensionen mit Korngrößen von  $3\text{ }\mu\text{m}$  bzw.  $1\text{ }\mu\text{m}$ .

Die Betrachtung der Schliffproben erfolgte mithilfe eines digitalen Auflichtmikroskops (Keyence VHX 5000). Die quantitative Auswertung der Faserwelligkeit wurde ebenfalls mithilfe der zuvor genannten Bildverarbeitungssoftware durchgeführt. Dazu erfolgte die Messung des Faserwelligkeitswinkels jedes Pins jeweils im Bereich der maximalen Faserwelligkeit an den Flanken der entstehenden harzreichen Zonen. Hierzu sind für jede untersuchte Versuchsreihe die Faserwelligkeitswinkel von mindestens 15 Einzelpins ausgewertet worden. Die Auswertung der Grenzflächen zwischen Pin und Laminat erfolgte hingegen rein qualitativ durch die optische Beurteilung entsprechend präparierter Prüfkörper.

## 3.4 Numerische Untersuchung des Ablöseverhaltens

Die numerische Untersuchung der Wärmeeigenspannungen zwischen rechteckigen und kreisrunden z-Pins und unidirektionalen bzw. quasi-isotropen CFK-Laminaten fand anhand von Einheitszellenmodellen statt. Unabhängig vom Laminataufbau bestanden diese aus 24 Einzellagen. Der Lagenaufbau der unidirektionalen ( $[0]_{24}$ ) bzw. quasi-isotropen ( $[\pm 45/0/90]_{3s}$ ) Modelle entsprach dabei dem in den Pullout-Untersuchungen verwendeten, um Rückschlüsse zwischen den Simulationsergebnissen und den erzielten Brückenkräften zu ermöglichen. Jede Einheitszelle beinhaltete einen einzelnen z-Pin, an dessen Grenzfläche zum Laminat die Auswirkungen der Abkühlung von der Aushärtetemperatur auf die resultierenden Grenzflächenspannungen und -schädigungen ermittelt werden sollten. Die Kantenlänge der Einheitszellenmodelle betrug 20 mm, um einen möglichen Einfluss von Randeffekten auf die Simulationsergebnisse ausschließen zu können. Die Dicke der Einheitszellen betrug 4,70 mm und berücksichtigte damit die Quellung des Laminats infolge der Pineinbringung.

Die z-Pins wurden als ideal kreisrund bzw. rechteckig angenommen, wobei die gewählten Abmessungen der Pins die Abweichungen der realen Pinabmessungen von den Nennwerten (siehe Tabelle 3.2) berücksichtigten. Um eine durchgehende Vernetzung der Pin-Laminat-Grenzfläche gewährleisten zu können, wurden die Kanten der rechteckigen z-Pins mit einem Eckenradius von 0,05 mm versehen. Form und Größe der durch die Pins hervorgerufenen harzreichen Zonen unterscheiden sich in Abhängigkeit der Pingeometrie sowie der Ausrichtung rechteckiger z-Pins im Laminat und sind durch die Vermessung entsprechender Mikroskopaufnahmen bestimmt worden.

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurde die Faserwelligkeit in unmittelbarer Umgebung des Pins durch die Implementierung eines diskreten Verteilungsfeldes berücksichtigt. Ein solches Verteilungsfeld, wie es in Abbildung 3.4 beispielhaft dargestellt ist, gibt die Verdrehung jedes einzelnen Elements in Bezug auf die globale x-Richtung innerhalb eines definierten Bereiches der Einheitszelle vor. Die Drehung der Elemente orientierte sich dabei in Abhängigkeit von der Pingeometrie und des Laminataufbaus an der jeweiligen Form der harzreichen Zonen. Die maximalen Winkel wurden am Übergang der Harzzone zum Laminat erreicht. In die faserreiche Richtung (y-Richtung) jeder Einzelschicht nahm die Elementdrehung linear ab, sodass Elemente außerhalb der vorgegebenen Faserwelligkeitsbereiche, deren Größe anhand von Mikroskopaufnahmen abgeschätzt wurde, von einer Drehung ihres lokalen Koordinatensystems unberührt blieben.

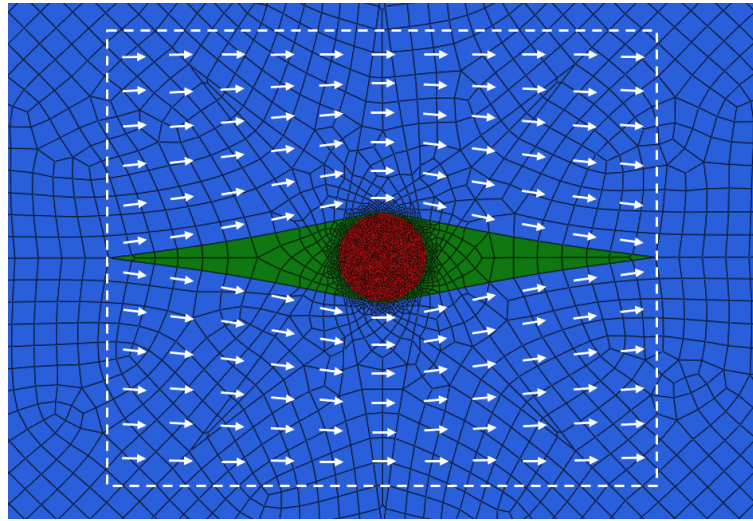


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des diskreten Verteilungsfeldes zur Berücksichtigung der Faserwelligkeit in der numerischen Untersuchung

Über eine Auslenkung aus der ideal senkrechten Orientierung im Laminat wurde in den Einheitszellenmodellen die auftretende Inklinations der z-Pins berücksichtigt. Um einen Einfluss des Inklinationswinkels auf die erzielten Ergebnisse auszuschließen, wurde sowohl für kreisrunde als auch rechteckige Pins ein einheitlicher Inklinationswinkel von  $15^\circ$  gewählt.

Die beschriebenen Einheitszellenmodelle beinhalten damit eine Vielzahl der im Stand der Technik dargelegten mikrostrukturellen Besonderheiten z-Pin-verstärkter FKV. Dennoch konnten im Rahmen der numerischen Untersuchungen nicht alle mikromechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden, sodass einige vereinfachende Annahmen getroffen werden mussten. So blieben beispielsweise der Fasereinzug in z-Richtung, eventuell auftretende Faserbrüche sowie der chemische Schrumpf des Matrixharzes während der Aushärtung unberücksichtigt. Darüber hinaus wurde das Modell als frei von Eigenspannungen zu Beginn des Abkühlvorgangs angenommen.

Für die Vernetzung der unterschiedlichen Bereiche innerhalb einer Lage der Einheitszellenmodelle wurde ein sternenförmiges zweidimensionales FE-Netz entwickelt und durch die Extrusion in z-Richtung eine Vernetzung aus finiten 3D-Volumenelementen erzeugt. Dieses zeichnete sich durch eine sehr geringe Elementkantenlänge von 0,012 mm im Bereich der Pin-Laminat-Grenzfläche aus. Die Elementgröße nahm dabei in Richtung der Außenkanten der Einheitszellenmodelle sukzessive zu, um den Rechenaufwand zur Durchführung der Simulation zu begrenzen. Jede der 24 Prepreglagen wurde aus vier Elementschichten aufgebaut. Das gesamte Einheitszellenmodell bestand damit aus 96 Elementschichten mit der in Abbildung 3.5 für kreisrunde und rechteckige z-Pins dargestellten Vernetzung.



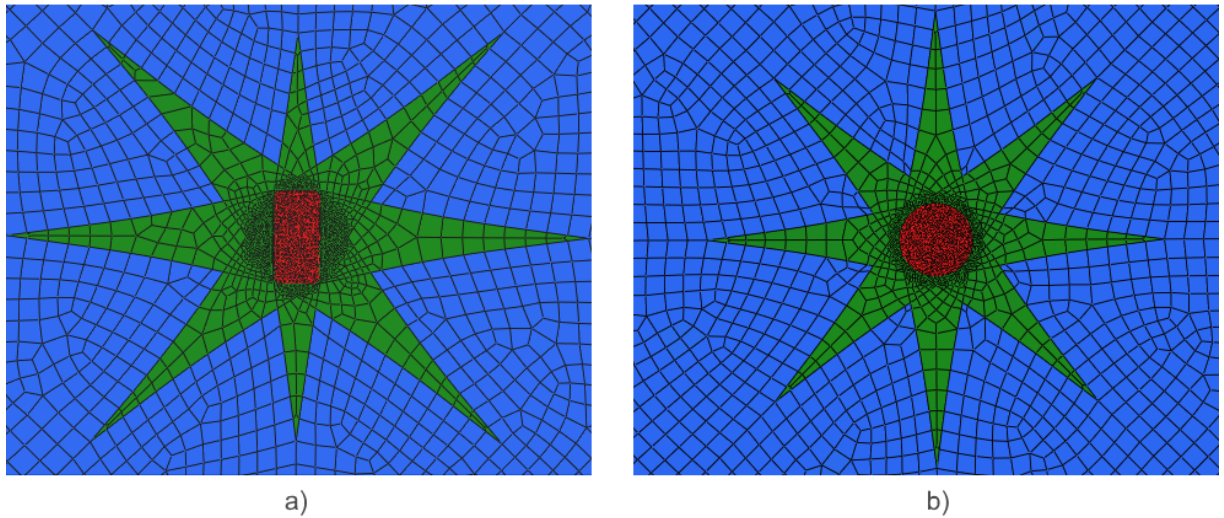


Abbildung 3.5: Darstellung des verwendeten Finite-Elemente-Netzes der Einheitszellenmodelle mit (a) rechteckigen und (b) kreisrunden z-Pins

Zur Modellierung von Laminat, z-Pins und Harzzonen wurde auf lineare, hexagonale finite Elemente (C3D8) zurückgegriffen. Zur Durchführung der numerischen Simulation wird dabei in Verbindung mit Faserverbundwerkstoffen, gegenüber klassischen isotropen Werkstoffen, eine Reihe zusätzlicher richtungsabhängiger Materialeigenschaften benötigt. Diese sind in Tabelle 3.4 getrennt für die einzelnen Werkstoffe innerhalb der Einheitszellenmodelle dargestellt.

Tabelle 3.4: Im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse verwendete Materialkennwerte der z-Pins, der harzreichen Zonen und des Laminats

Eigenschaft	Harzzone	Laminat	z-Pin
Steifigkeit $E$ [MPa]	3.540	-	-
Steifigkeit $E_{11}$ [MPa]	-	148.000	139.480
Steifigkeit $E_{22} = E_{33}$ [MPa]	-	9.000	8.500
Schubmodul $G$ [MPa]	1700	-	-
Schubmodul $G_{12} = G_{13}$ [MPa]	-	5.200	5.000
Schubmodul $G_{23}$ [MPa]	-	3.500	3.200
Querkontraktion $\nu$ [ ]	0,35	-	-
Querkontraktion $\nu_{12} = \nu_{13}$ [ ]	-	0,27	0,30
Querkontraktion $\nu_{21} = \nu_{31}$ [ ]	-	0,016	0,018
Querkontraktion $\nu_{23}$ [ ]	-	0,29	0,33
Wärmeausdehnung $\alpha$ [ $10^{-6}/K$ ]	50	-	-
Wärmeausdehnung $\alpha_{11}$ [ $10^{-6}/K$ ]	-	-0,76	-0,60
Wärmeausdehnung $\alpha_{22} = \alpha_{33}$ [ $10^{-6}/K$ ]	-	36	32

Die Darstellung der Grenzfläche zwischen Pin und Laminat erfolgte über dreidimensionale Kohäsivelemente (COH3D8) mit einer Elementdicke von 0,001 mm. Die verwendeten Materialeigenschaften der Grenzflächenelemente sind in Tabelle 3.5 angegeben und orientierten sich an den von Zhang et al. [11] für eine vergleichbare Materialkombination genutzten und über experimentelle Untersuchungen verifizierten Werten.

Die numerische Berechnung der thermischen Grenzflächenspannungen wurde mithilfe des kommerziellen FE-Programmpakets ABAQUS/Explicit durchgeführt. Dazu wurden alle Elemente der Einheitszellenmodelle einer linearen Abnahme der Temperatur um 158°C ausgesetzt, was einer Abkühlung des Laminats von der Aushärtetemperatur (180°C) auf eine Temperatur von 22°C entsprach. Anhand der FE-Analyse sollte dabei das Ablöseverhalten von kreisrunden und rechteckigen z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten gegenübergestellt werden. Im Fokus der Auswertung stand neben der Bestimmung der für die Grenzflächenschädigungen verantwortlichen Spannungszustände am Pin ebenso die quantitative Abschätzung des Anteils der vom Laminat abgelösten Pinoberfläche in Abhängigkeit von der Pin geometrie sowie der Ausrichtung der rechteckigen z-Pins in unidirektionalen FKV.

Tabelle 3.5: Im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse verwendete Materialkennwerte der Kohäsivelemente

Eigenschaft	Wert
Steifigkeit $K_I$	100.000 N/mm <sup>3</sup>
Steifigkeit $K_{II}$	100.000 N/mm <sup>3</sup>
Beanspruchbarkeit $\sigma_{I,max}$	19 MPa
Beanspruchbarkeit $\sigma_{II,max}$	60 MPa
krit. Energiefreisetzungsrates $G_{IC}$	0,004 kJ/m <sup>2</sup>
krit. Energiefreisetzungsrates $G_{IIC}$	1,00 kJ/m <sup>2</sup>
Parameter für Versagenskriterium $\beta$	1,00

## 3.5 Experimentelle Untersuchungen

### 3.5.1 Pullout-Eigenschaften

Zur Untersuchung der Pullout-Eigenschaften kreisrunder und rechteckiger z-Pins wurden Prüfkörper mit einer Grundfläche von  $40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  hergestellt und mittig, in einem Bereich von  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , mit z-Pins verstärkt. Der Pingegehalt in diesem Bereich betrug für alle Proben 2,0 % (16 Pins). Unidirektional ( $[0]_{24}$ ) sowie quasi-isotrop ( $[\pm 45/0/90]_{3s}$ ) aufgebaute Prüfkörper wurden verwendet, um den Einfluss der Pingeometrie auf das Auszugsverhalten in unterschiedlichen Laminataufbauten untersuchen zu können.

Sämtliche Prüfkörper wurden in der Mittelebene durch eine  $10\text{ }\mu\text{m}$  dicke Polytetrafluorethylen (PTFE)-Trennfolie getrennt, um eine Anhaftung der dadurch entstehenden Prüfkörperhälften zu vermeiden und sicherzustellen, dass während des Versuchs ausschließlich Kräfte über die z-Pins übertragen werden. Die Lasteinleitung wurde durch das beidseitige Applizieren T-förmiger Krafteinleitungselemente auf die Prüfkörper mittels eines Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoffs auf Epoxidharzbasis (Scotch-Weld DP 490) ermöglicht. Um den Einfluss von Pingeometrie und -ausrichtung auf die erzielbaren Brückenkräfte ermitteln zu können, sind Prüfkörper mit kreisrunden sowie längs und quer zur  $0^\circ$ -Richtung der Verstärkungsfasern ausgerichteten rechteckigen z-Pins hergestellt worden. Der schematische Aufbau der verwendeten Prüfkörper, deren theoretische Dicke  $4,43\text{ mm}$  betrug, ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

Die experimentelle Untersuchung des Pulloutverhaltens wurde mithilfe einer servohydraulischen Prüfmaschine (MTS 858) durchgeführt. Zur Ermittlung der Brückenkraftkurven wurden die Prüfkörper dabei quasi-statisch mit einer Prüfgeschwindigkeit von  $0,5\text{ mm/min}$  bis zum vollständigen Auszug der Pins aus dem Laminat belastet und der zurückgelegte Auszugsweg sowie die resultierende Rückstellkraft aufgezeichnet. Da sich die von der Prüfmaschine gemessene Verschiebung nicht ausschließlich aus dem Auszugsweg der z-Pins, sondern auch der Verformung des Laminats, der Klebschicht und der Krafteinleitungselemente zusammensetzt, wurden separate Versuche an nicht verpinnten Prüfkörpern ohne PTFE-Trennschicht unter den selben Prüfbedingungen durchgeführt. Die dabei ermittelte Verformung in Abhängigkeit des von der Prüfmaschine aufgezeichneten Wegs wurde bei der Auswertung der erzielten Brückenkraftkurven berücksichtigt.

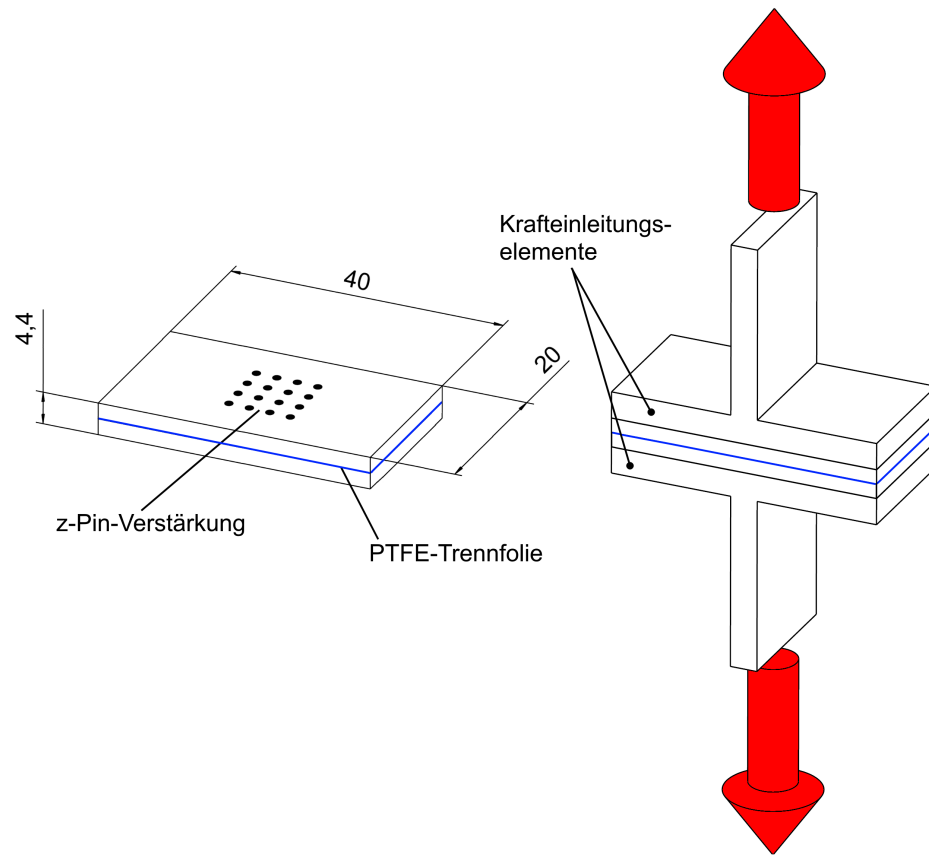


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der verwendeten Pullout-Prüfkörper

Pro Testreihe wurden je fünf Prüfkörper getestet und aus den gewonnenen Versuchsdaten die durchschnittliche Ablösekraft pro Pin  $P_d$  und die maximale Reibkraft pro Pin  $P_f$  ermittelt. Der Versuchsplan der experimentellen Untersuchungen zum Pullout-Verhalten rechteckiger und kreisrunder z-Pins ist in Tabelle 3.6 dargestellt.

Tabelle 3.6: Versuchsplan zur Durchführung der Pullout-Untersuchungen

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt
UD	eckig	längs	2,0 %
UD	eckig	quer	2,0 %
UD	rund	-	2,0 %
QI	eckig	-	2,0 %
QI	rund	-	2,0 %

Rechteckige und kreisrunde z-Pins stellen bei gleichem Pingehalt eine unterschiedlich große Oberfläche, die der Übertragung von Brückenkräften dient, zur Verfügung. Die alleinige Gegenüberstellung der übertragenen Ablöse- und Reibkräfte ist daher zum Vergleich bei der Pingemetrien nicht ausreichend. Stattdessen ist es zweckmäßig, die Wirksamkeit der

z-Pins zusätzlich über auf die Pinoberfläche bezogene Kenngrößen zu vergleichen. Unter Annahme einer gleichmäßigen Schubspannungsverteilung über die gesamte Pinlänge lassen sich mithilfe der Gleichungen 3.3 und 3.4 Rückschlüsse über mögliche Unterschiede in den übertragbaren Schubspannungen in der Grenzfläche zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins ziehen.

$$\tau_d = \frac{1}{L_W} \frac{P_d}{U_{Pin}} \quad (3.3)$$

$$\tau_f = \frac{1}{L_W - \delta_f} \frac{P_f}{U_{Pin}} \quad (3.4)$$

Dabei ist  $\tau_d$  die Schubspannung in der Grenzfläche zum Zeitpunkt der Ablösung des Pins vom Laminat,  $\tau_f$  die Schubspannung in der Grenzfläche zum Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Reibkraft,  $L_W$  die Wirklänge der Pins und  $U_{Pin}$  der Umfang eines z-Pins. Die Wirklänge der z-Pins entspricht dabei ihrer halben eingebrachten Länge, welche neben der tatsächlichen Laminatdicke ebenfalls vom Inklinationswinkel der Pins abhängig ist.

Aus dem gemessenen Brückenkraftverlauf kann zusätzlich die während des Pinauszugs dissipierte Energie als Flächeninhalt unter der Kraft-Weg-Kurve errechnet werden. Diese wird, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, aufgrund der unterschiedlichen Wirkmechanismen üblicherweise in die elastische Deformationsarbeit  $W_{el}$  und die während des reibungsbehafteten Pinauszugs verrichtete Arbeit  $W_f$  unterteilt. Die Gesamtarbeit  $W_{ges}$  kann anschließend aus ihren beiden Einzelkomponenten nach Gleichung 3.5 berechnet werden.

$$W_{ges} = W_{el} + W_f = \int_0^{\delta_d} P(\delta) d\delta + \int_{\delta_d}^{\delta_p} P(\delta) d\delta \quad (3.5)$$

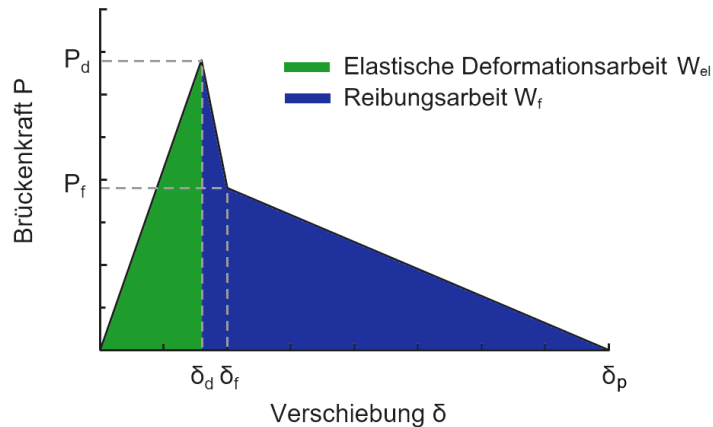


Abbildung 3.7: Graphische Darstellung der Anteile der elastischen Deformationsarbeit  $W_{el}$  und der Reibungsarbeit  $W_f$  an der während des Pulloutversuchs dissipierten Gesamtenergie

#### 3.5.2 Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-I-Beanspruchung

Die Untersuchungen zu den bruchmechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter FKV unter Mode-I-Beanspruchung fanden im sogenannten Double Cantilever Beam (DCB) Verfahren statt. Alle DCB-Prüfkörper wurden aus 24 Einzellagen mit unidirektionalem ( $[0]_{24}$ ) bzw. quasi-isotropem ( $[\pm 45/0/90]_{3s}$ ) Lagenaufbau aufgebaut. Die Gesamtlänge der Prüfkörper betrug 190 mm, die Breite des verpinnnten Bereichs der Proben 14 mm.

An einem Ende der Probe wurde ein 10  $\mu\text{m}$  dicker PTFE-Trennfilm zur Erzeugung eines künstlichen Anrisses in die Mittelebene jedes Prüfkörpers einlaminiert. Der Bereich der z-Pin-Verstärkung begann 10 mm hinter dem Anriss und erstreckte sich bis zum Ende der Probe. Um ein vorzeitiges Versagen der Proben während des Belastungsvorgangs zu verhindern, wurden die Prüfkörper im Anschluss an den Verpinnprozess zusätzlich auf beiden Seiten mit jeweils zehn unidirektionalen  $0^\circ$ -Lagen verstärkt. Die nominelle Gesamtdicke der Proben betrug damit 8,1 mm, wobei lediglich die inneren 24 Lagen ( $t = 4,42 \text{ mm}$ ) mit z-Pins verstärkt waren.

Ein Ende der Prüfkörper wurde nach der Aushärtung mit Aluminiumblöcken versehen (Klebstoff: Scotch-Weld DP 490), über welche die Mode-I-Rissöffnungskraft in die Proben eingeleitet wurde. Um ein Versagen der Klebung und damit den vorzeitigen Abbruch der Versuche zu vermeiden, wurde die Breite der Probe im Bereich der Krafteinleitung auf 25 mm verbreitert. Die Kraft wurde über eine Bohrung mittig in die Krafteinleitungsblöcke eingeleitet. Die Länge des künstlichen Anrisses  $a_0$  betrug 37,5 mm.

### 3.5 Experimentelle Untersuchungen

Eine Seite der Proben wurde im Vorfeld der Untersuchungen weiß eingefärbt und ein Maßstab mit einer Teilung von 1 mm auf diese appliziert, um die Lage der Risspitze während der Versuchsdurchführung bestimmen zu können. Der schematische Aufbau der Proben ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

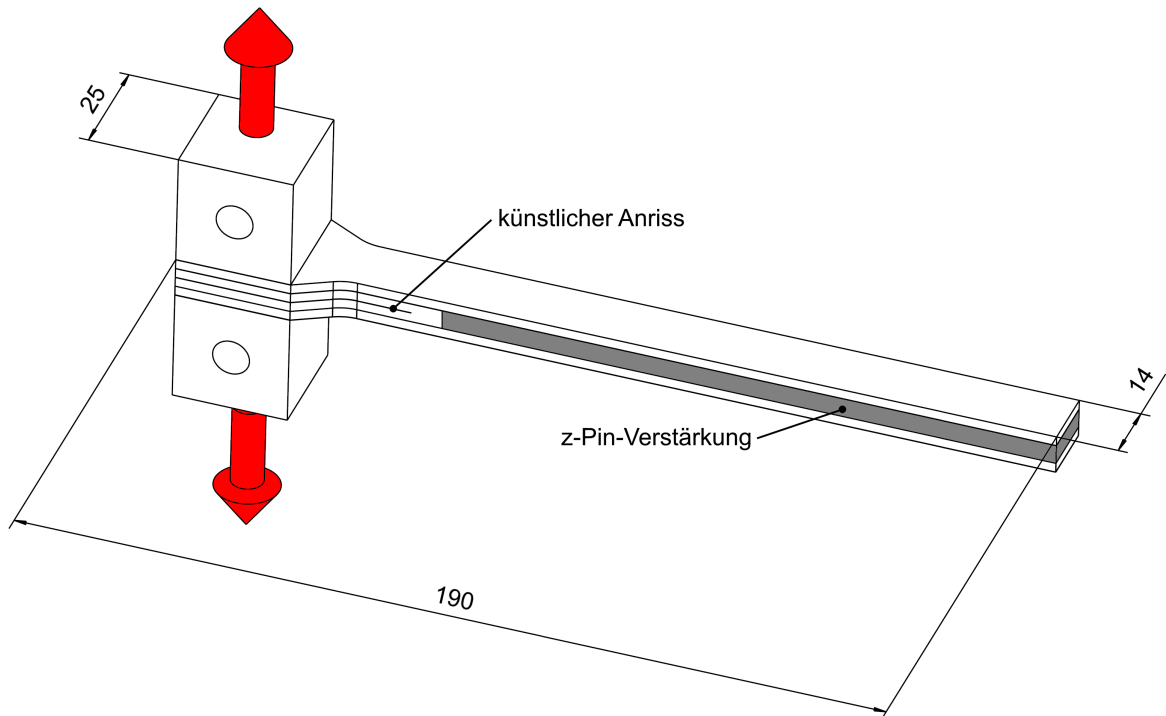


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der verwendeten DCB-Prüfkörper

Tabelle 3.7: Versuchsplan zur Durchführung der Mode-I-Untersuchungen

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt
UD / QI	-	-	0,0 %
UD / QI	eckig	längs	0,5 %
UD / QI	eckig	längs	1,0 %
UD / QI	eckig	längs	2,0 %
UD / QI	eckig	quer	2,0 %
UD / QI	rund	-	2,0 %

In Tabelle 3.7 ist der Versuchsplan zur Durchführung der bruchmechanischen Untersuchungen unter quasi-statischer und schwingender Mode-I-Rissöffnungsbeanspruchung dargestellt. Zur Ermittlung der bruchmechanischen Eigenschaften wurden je fünf Prüfkörper quasi-statisch mit einer konstanten Rissöffnungsgeschwindigkeit von 2 mm/min in einer servohydraulischen Prüfmaschine (MTS 858) bis zum vollständigen Versagen der Probe belastet. Während des Versuchs wurden die aufgebrachte Kraft  $P$  sowie die Rissöffnung  $\delta$  gemessen. Mit zunehmender Rissöffnungsverschiebung wuchs der Riss entlang der Mittelebene der Probe und die Lage der Risspitze wurde alle drei Sekunden, zusammen mit den

dazugehörigen Werten für den Rissöffnungsweg und die Rückstellkraft, mithilfe eines HD Kamera Systems (Panasonic HC-V777) aufgezeichnet. Aus den zur Verfügung stehenden Einzelbildern konnte anschließend die kritische Energiefreisetzungsrate  $G_{IC}$  als bruchmechanische Kenngröße jeder Probe gemäß ISO 15024 [98] wie folgt berechnet werden:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \frac{F}{N_K} \quad (3.6)$$

Dabei ist  $a$  die Länge des interlaminaren Risses in der Probe,  $b$  die Breite der DCB-Proben im verpinnten Bereich und  $\Delta$  ein Korrekturfaktor, der grafisch nach [98] ermittelt wurde. Die Korrekturfaktoren  $F$  für große Verformungen und  $N_K$  für die Benutzung von Krafteinleitungsblöcken wurde mithilfe der Formeln 3.7 und 3.8 bestimmt [98].

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left( \frac{\delta}{a} \right)^2 - \frac{2}{3} \frac{\delta l_1}{a^2} \quad (3.7)$$

$$N_K = 1 - \left( \frac{l_2}{a} \right)^3 - \frac{9}{8} \left[ 1 - \left( \frac{l_2}{a} \right)^2 \right] \frac{\delta l_1}{a^2} - \frac{9}{35} \left( \frac{\delta}{a} \right)^2 \quad (3.8)$$

Dabei ist  $l_1$  der vertikale Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Lasteinleitung und der Mittelebene der Prüfkörper und  $l_2$  der horizontale Abstand vom Mittelpunkt der Lasteinleitung zur Kante des Krafteinleitungselements.

Zur Charakterisierung des Verhaltens z-Pin-verstärkter FKV unter schwingender Mode-I-Beanspruchung wurden Risswachstumskurven erzeugt und hinsichtlich eines möglichen Einflusses von Pingeometrie und -ausrichtung ausgewertet. Dazu wurden die Prüfkörper zunächst quasi-statisch mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min bis über das Erreichen der Maximalkraft hinaus belastet, um so den möglichen Einfluss einer noch nicht voll ausgebildeten Brückenzone auf die Versuchsergebnisse ausschließen zu können. Anschließend wurden die Prüfkörper einer schwingenden, sinusförmigen Belastung ausgesetzt und die Risswachstumsgeschwindigkeit  $da/dN$  in Abhängigkeit von der Höhe der Beanspruchungsamplitude  $\Delta G_I$  ermittelt. Das Aufbringen der Belastung erfolgte weggesteuert mit einem konstanten Verhältnis zwischen dem minimalen Rissöffnungsweg  $\delta_{min}$  und dem maximalen Rissöffnungsweg  $\delta_{max}$  von 0,1.



Die angestrebte Belastungsfrequenz betrug 10 Hz. Aufgrund der großen Verschiebungen, die vor allem für Prüfkörper mit einem hohen Pingegehalt zur Erzielung großer Risswachstumsgeschwindigkeiten notwendig waren, musste die Frequenz für einige Proben in Abhängigkeit des notwendigen Kolbenwegs der Prüfmaschine auf bis zu 5 Hz abgesenkt werden.

Um während der Belastung eine nahezu konstante Beanspruchungsamplitude sicherstellen zu können, wurde das Risswachstum während eines Lastniveaus lediglich über eine geringe Risswachstumslänge  $\Delta a$  von maximal 10 mm gemessen und anschließend der Vorgang durch Erhöhung von  $\Delta G_I$  für das nächsthöhere Lastniveau wiederholt. Die Höhe der Lastniveaus für jede Prüfreihe wurde anhand von Vorversuchen festgelegt. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass durch die Versuche ein breites Spektrum an Risswachstumsgeschwindigkeiten über mehrere Größenordnungen hinweg abgedeckt wurde. Die Messung der Risslänge vor und nach der schwingenden Belastung eines Lastniveaus erfolgte nach dem für die quasi-statischen Untersuchungen beschriebenen Prinzip aus Einzelbildaufnahmen der Risspitze mit der dazugehörigen Kraft  $P$  und der Rissöffnung  $\delta$ . Die Risswachstumsgeschwindigkeit wurde anschließend für jedes Lastniveau als mittlere Risswachstumsgeschwindigkeit nach Gleichung 3.9 errechnet.

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a}{N} \quad (3.9)$$

$$\frac{da}{dN} = C \Delta G^M \quad (3.10)$$

Die Auswertung der Untersuchungen erfolgte anhand von Rissfortschrittskurven, zu deren Erzeugung die errechneten Rissfortschrittsgeschwindigkeiten doppelt-logarithmisch über die Beanspruchungsamplitude aufgetragen wurden. Eine typische, durch einen dreiphasigen Verlauf gekennzeichnete Rissfortschrittskurve ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Unterhalb eines Schwellwertes  $\Delta G_{I,th}$  findet dabei kein messbarer Rissfortschritt in der Probe statt. Oberhalb dieses Wertes steigt  $da/dN$  zunächst kontinuierlich an und geht in einen Bereich über, in dem die Rissfortschrittsgeschwindigkeit in einem exponentiellen Zusammenhang zur Beanspruchungsamplitude steht. Dieser kann durch Gleichung 3.10 mithilfe eines materialabhängigen Parameters  $C$  und eines Gradienten  $M$  beschrieben werden [2]. Eine darüber hinausgehende Steigerung von  $\Delta G_I$  führt zu einer weiteren Beschleunigung des Risswachstums bis ab einem Grenzwert  $\Delta G_{I,c}$  instabiles Risswachstum einsetzt und der Riss innerhalb eines Belastungszyklus durch die Probe wächst.

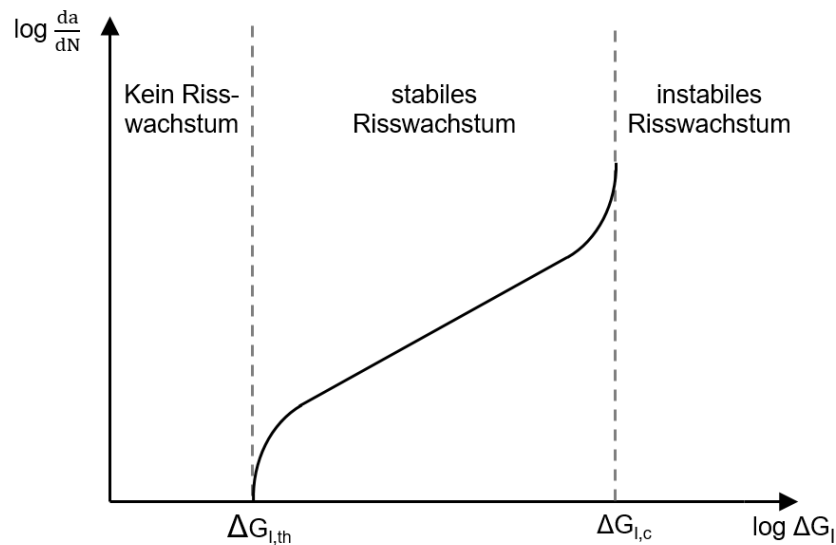


Abbildung 3.9: Charakteristische Rissfortschrittskurve unter schwingender Rissöffnungsbeanspruchung

#### 3.5.3 Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-II-Beanspruchung

Die Untersuchungen der bruchmechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter Lamine unter quasi-statischer und schwingender Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung wurden an sogenannten End Notched Flexure (ENF) Prüfkörpern durchgeführt. Diese waren 260 mm lang, 14 mm breit und wurden aus 24 Prepreglagen in unidirektionalem ( $[0]_{24}$ ) bzw. quasi-isotropem Lagenaufbau ( $[\pm 45/0/90]_{3s}$ ) hergestellt.

Durch das Einlaminieren eines  $10\,\mu\text{m}$  dicken PTFE-Films in die Mittelebene wurde an einem Ende der Prüfkörper ein künstlicher Anriss erzeugt. Der Bereich der z-Pin Verstärkung begann 10 mm hinter dem Anriss und erstreckte sich über eine Länge von 130 mm. Analog zu den DCB-Proben wurden die Prüfkörper im Anschluss an die Pineinbringung zusätzlich auf beiden Seiten mit jeweils zehn unidirektionalen  $0^\circ$ -Lagen verstärkt. Die rechnerische Gesamtdicke der Prüfkörper betrug damit 8,1 mm.

Zur Bestimmung der bruchmechanischen Eigenschaften unter quasi-statischer Mode-II-Beanspruchung wurden die Prüfkörper, wie in Abbildung 3.10 dargestellt, einer Dreipunkt-Biegung mit einem Abstand der beiden unteren Auflager von 180 mm ausgesetzt. Dabei wurden die Proben mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min in einer servohydraulischen Prüfmaschine (MTS 858) belastet und während des Versuchs die aufgebrachte Kraft  $P$  sowie die Durchbiegung  $d$  der Proben gemessen. Aus der Position der Auflager ergab sich eine Anrisslänge zu Beginn der Versuche von 40 mm.

Die Lage der Risspitze sowie die dazugehörigen Werte für die Durchbiegung und die aufgebrachte Kraft wurden alle drei Sekunden mithilfe eines HD Kamera Systems (Panasonic HC-V777) aufgezeichnet. Die aus der Durchbiegung resultierende Scherbeanspruchung zwischen den Rissflanken erzeugt in der Risspitze eine quasi-statische Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung und die kritische Energiefreisetzungsrate  $G_{IIC}$  jeder Probe konnte mithilfe der im Vorfeld der Versuche gemessenen Probenbreite  $b$  und des Auflagerabstands  $L$  nach DIN EN 6034 [99] gemäß Formel 3.11 berechnet werden. Für jede der zwölf in Tabelle 3.8 dargestellten Versuchsreihen wurden je fünf Prüfkörper getestet.

$$G_{IIC} = \frac{9Pa^2d}{2b(1/4L^3 + 3a^3)} \quad (3.11)$$

Die Erzeugung von Risswachstumskurven zur Untersuchung der bruchmechanischen Eigenschaften unter schwingender Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung fand in einem in Abbildung 3.11 schematisch dargestellten mehrstufigen Versuch statt. Dazu wurden die Prüfkörper zunächst unter Verwendung eines verkürzten Auflagerabstands von 120 mm quasi-statisch mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Einsetzen des Risswachstums belastet, um einen Einfluss des nicht verpinnten Bereichs direkt hinter dem künstlichen Anriss auf die Risswachstumskurven auszuschließen. Die daraus resultierende Risslänge  $a$  diente der Bestimmung der Auflagerpositionen im anschließenden Versuch unter schwingender Belastung. Die Position der Auflager wurde dabei so gewählt, dass der Versuchsaufbau für den Schwingversuch mit einer Anrisslänge von 40 mm und einem Abstand der unteren Auflager von 180 mm dem für die beschriebenen quasi-statischen Versuche entsprach.

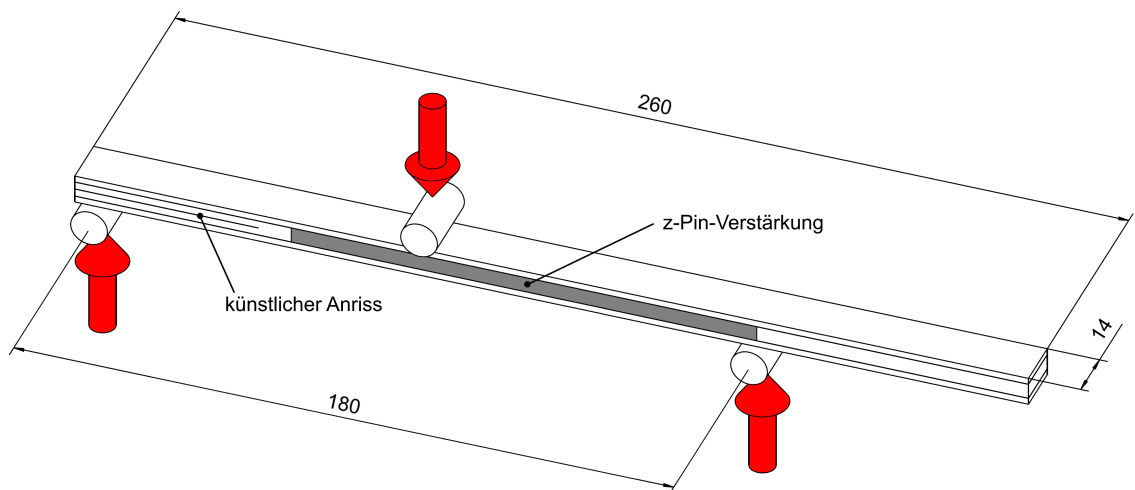


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung der verwendeten ENF-Prüfkörper

Tabelle 3.8: Versuchsplan zur Durchführung der Mode-II-Untersuchungen

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt
UD / QI	-	-	0,0 %
UD / QI	eckig	längs	0,5 %
UD / QI	eckig	längs	1,0 %
UD / QI	eckig	längs	2,0 %
UD / QI	eckig	quer	2,0 %
UD / QI	rund	-	2,0 %

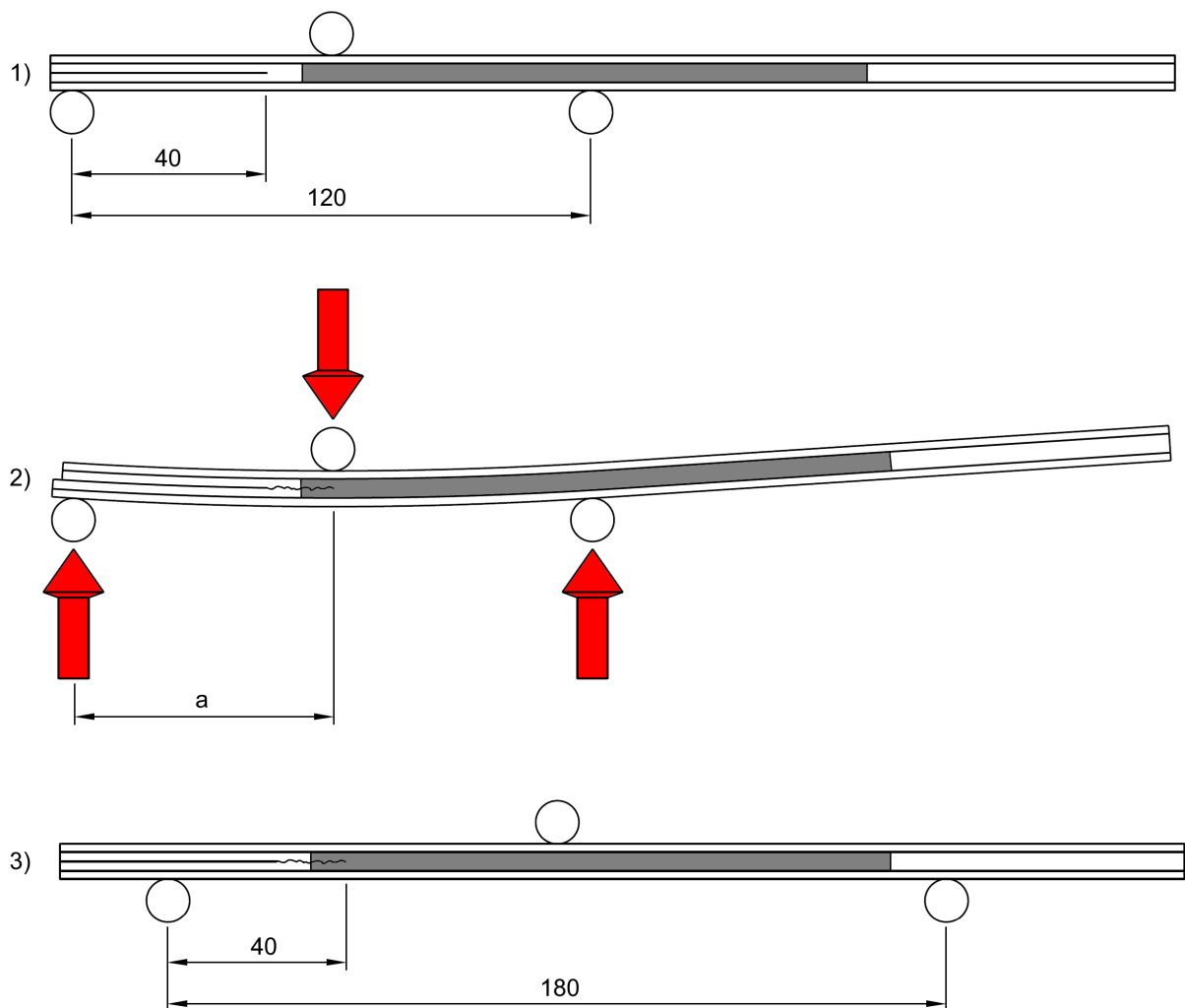


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Anrisserzeugung für die Untersuchungen unter schwingender Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung. 1): Versuchsaufbau zur Anrisserzeugung. 2): Quasi-statische Beanspruchung bis zum Einsetzen des Risswachstums. 3): Versuchsaufbau für die Versuche unter schwingender Mode-II-Beanspruchung

Die Prüfkörper wurden anschließend einer schwingenden, sinusförmigen Belastung ausgesetzt und die Risswachstumsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe der Belastung ermittelt. Das konstante Verhältnis der minimalen  $d_{min}$  und der maximalen Probendurchbiegung  $d_{max}$  betrug 0,1. Die Belastung der Probe erfolgte weggesteuert mit einer Prüffrequenz von 10 Hz. Die Prüfkörper wurden dabei auf unterschiedlichen Lastniveaus belastet, wobei das Risswachstum innerhalb eines Lastniveaus auf eine Länge von 10 mm beschränkt wurde, um während des Versuchs eine nahezu konstante Belastungsamplitude  $\Delta G_{II}$  sicherstellen zu können. Analog zu den Mode-I-Versuchen wurde die Höhe der Lastniveaus für jede Prüfreihe anhand von Vorversuchen festgelegt, um sicherzustellen, dass ein breites Spektrum an Risswachstumsgeschwindigkeiten abgedeckt werden konnte. Die Messung der Risslänge zu Beginn und am Ende jedes Lastniveaus erfolgte wie zuvor beschrieben aus Einzelbildaufnahmen der Risspitzenposition und der dazugehörigen Kraft sowie der Probendurchbiegung. Die Auswertung der Versuche erfolgte ebenfalls analog der zuvor beschriebenen Mode-I-Untersuchungen anhand von Rissfortschrittskurven und dem Vergleich der charakteristischen Kennwerte jeder Versuchsreihe  $\Delta G_{II,th}$  und  $\Delta G_{II,c}$ .

#### 3.5.4 Zugsteifigkeit und -festigkeit

Die Geometrie der zur Bestimmung der Zugeigenschaften unter quasi-statischer und schwingender Belastung verwendeten Prüfkörper ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Die 220 mm langen und 14 mm breiten Proben wurden mittig über die gesamte freie Länge zwischen der Krafteinleitung von 100 mm mit z-Pins versehen. Um das Versagen der Proben im Bereich der Einspannung zu verhindern, wurden die Prüfkörperenden durch geschäftete, 2 mm dicke GFK-Krafteinleitungselemente ([0/90]) unter Verwendung eines Zweikomponentenklebstoffs (Scotch-Weld DP 490) verstärkt.

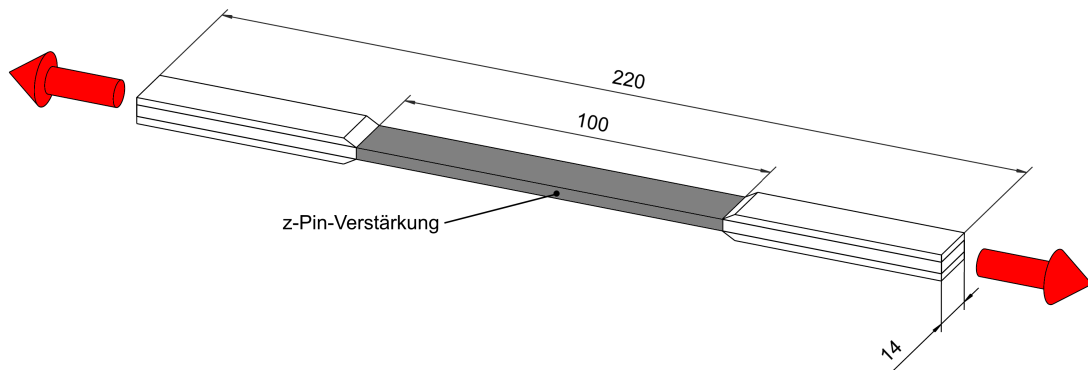


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der verwendeten Prüfkörper zur Bestimmung der Zugeigenschaften

### 3.5 Experimentelle Untersuchungen

Um den Einfluss der z-Pin-Verstärkung auf Prüfkörper verschiedenen Laminataufbaus überprüfen zu können, wurden quasi-isotrope sowie unidirektionale Proben hergestellt. Die unidirektionalen Prüfkörper wurden aus zwölf 0°-Einzellagen gefertigt, woraus eine theoretische Prüfkörperdicke von 2,21 mm resultierte. Aufgrund des für heißaushärten-de Verbundwerkstoffe erforderlichen symmetrischen und ausgeglichenen Laminataufbaus, wurden die quasi-isotropen Prüfkörper aus 16 Einzellagen ( $[\pm 45/0/90]_{2s}$ ) aufgebaut, so-dass sich für diese eine rechnerische Dicke von 2,94 mm ergab.

Die maximale Zuglast wurde durch die für die Zugversuche verwendete Prüfmaschine auf 100 kN begrenzt. Eine Angleichung der Prüfkörperdicken durch eine Erhöhung der Lagen-anzahl der UD-Proben war aufgrund der hohen Festigkeit der verwendeten Fasern daher nicht möglich. Da die Prüfkörperdicken bei der Verwendung von z-Pins prozessbedingt typischerweise um einige Zehntelmillimeter schwanken und darüber hinaus im Verlauf der Versuchsauswertung ausschließlich mit auf die Querschnittsfläche bezogenen Größen gear-beitet wurde, stellt die unterschiedliche Probengeometrie keine Schwierigkeit im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern dar.

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit und -steifigkeit wurden für jede Versuchsreihe je fünf Prüfkörper quasi-statisch in einer servohydraulischen Prüfmaschine (MTS 322.21) mit ei-ner Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min bis zum Bruch belastet und während des Versuchs die benötigte Kraft sowie die Längenänderung der Probe aufgezeichnet. Die Messung der Längenänderung erfolgte dabei mithilfe eines mittig an den Proben befestigten Axial-Extensometers (MTS 634.25) in einem Messbereich von 50 mm. Einen Überblick über die in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Prüfreiheiten liefert Tabelle 3.9.

Tabelle 3.9: Versuchsplan zur Untersuchung der mechanischen Zugeigenschaften

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt	Beanspruchungsniveaus
UD	-	-	0,0 %	97 %, 94 %, 92 %, 90 %
UD	eckig	längs	0,5 %	95 %, 90 %, 87 %, 85 %
UD	eckig	längs	1,0 %	95 %, 90 %, 87 %, 85 %
UD	eckig	längs	2,0 %	95 %, 92 %, 90 %, 85 %
UD	eckig	quer	2,0 %	90 %, 87 %, 85 %, 80 %
UD	rund	-	2,0 %	90 %, 87 %, 85 %, 80 %
QI	-	-	0,0 %	97 %, 95 %, 92 %, 90 %
QI	eckig	längs	0,5 %	95 %, 92 %, 90 %, 87 %
QI	eckig	längs	1,0 %	95 %, 92 %, 90 %, 87 %
QI	eckig	längs	2,0 %	95 %, 92 %, 87 %, 82 %
QI	eckig	quer	2,0 %	90 %, 87 %, 82 %, 77 %
QI	rund	-	2,0 %	90 %, 87 %, 82 %, 77 %

### 3.5 Experimentelle Untersuchungen

---

Aus den aufgezeichneten Messdaten sowie den im Vorfeld der Untersuchungen bestimmten Probenabmessungen konnten im Rahmen der Versuchsauswertung die Zugfestigkeit  $R_z$  sowie der Zug-E-Modul  $E_z$  ermittelt werden. Letzterer ist nach DIN EN ISO 527 als Sekantenmodul in einem Dehnungsbereich zwischen 0,05 % und 0,25 % mithilfe nachfolgender Formel zu bestimmen [100]:

$$E_z = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (3.12)$$

Dabei sind  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  die in der Probe herrschenden Zugspannungen bei ihren dazugehörigen Dehnungen von  $\epsilon_1 = 0,05 \%$  bzw.  $\epsilon_2 = 0,25 \%$ .

Zur Ermittlung des Einflusses rechteckiger und kreisrunder z-Pins auf die Ermüdungseigenschaften der Prüfkörper wurden zusätzlich kraftgesteuerte Versuche unter schwingender, sinusförmiger Zug-Schwell-Belastung und einer Belastungsfrequenz von 5 Hz durchgeführt. Das Verhältnis von minimaler Beanspruchung  $\sigma_u$  zu maximaler Beanspruchung  $\sigma_o$  betrug 0,6.

Die Ermittlung der Lebensdauerkurven fand im Einstufenversuch statt. Dazu wurden für jede Versuchsreihe Prüfkörper auf insgesamt vier unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus belastet und die jeweilige Bruchschwingspielzahl  $N$  ermittelt. Die Maximalbeanspruchungen der verwendeten Beanspruchungsniveaus sind in Tabelle 3.9 im Verhältnis zum Mittelwert der Zugfestigkeit der jeweiligen Testreihe dargestellt. Diese unterscheiden sich, um trotz des unterschiedlichen Ermüdungsverhaltens jeder Versuchsreihe sicherzustellen, dass eine große Bandbreite an Bruchschwingspielen abgedeckt werden konnte. Auf jedem Beanspruchungsniveau wurden je drei Prüfkörper bis zum Bruch belastet und die Bruchschwingspielzahl ermittelt. Im Falle von Prüfkörpern, bei denen kein Bruch eingetreten ist, wurde der Versuch nach  $10^6$  Schwingspielen abgebrochen.

Im Anschluss an die experimentellen Versuche wurden aus den ermittelten Bruchschwingspielzahlen Lebensdauerkurven ermittelt, welche gemäß Formel 3.13 beschrieben werden können.

$$\sigma_o = m \ln N + c \quad (3.13)$$

Dabei ist  $m$  die Neigung der Lebensdauerkurve und  $c$  eine Materialkonstante, die unter anderem vom Grundwerkstoff und der gewählten z-Pin-Verstärkung abhängig ist. Vor allem der Vergleich der Neigung der Lebensdauerkurven gibt Aufschluss über eine eventuelle Beschleunigung der Ermüdungserscheinungen im Werkstoff, die durch die Verwendung von z-Pins oder die Änderung der Pingeometrie hervorgerufen worden sein könnte.

#### 3.5.5 Drucksteifigkeit und -festigkeit

Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften sowie des Ermüdungsverhaltens z-Pin-verstärkter Lamine unter Druckbelastung erfolgte an Prüfkörpern mit unidirektionalem ( $[0]_{12}$ ) und quasi-isotropem ( $[\pm 45/0/90]_{2s}$ ) Lagenaufbau. Sämtliche Proben waren 114 mm lang sowie 14 mm breit und wurden mittig über eine Länge von 14 mm mit z-Pins verstärkt. Analog zu den beschriebenen Zugprüfkörpern ergeben sich aus der unterschiedlichen Lagenanzahl verschiedene Prüfkörperdicken von 2,21 mm für unidirektionale und 2,96 mm für quasi-isotrope Proben. Mithilfe des Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoffs Scotch-Weld DP 490 sind an den während des Druckversuchs eingespannten Enden der Proben geschäftete, 2 mm dicke GFK-Krafteinleitungselemente ( $[0/90]$ ) aufgebracht worden. Die verwendete Prüfkörpergeometrie ist schematisch in Abbildung 3.13 dargestellt.

Zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Pingeometrien auf die Druckeigenschaften von FKV-Laminaten wurden Prüfkörper untersucht, welche mit längs bzw. quer zur Belastungsrichtung ausgerichteten rechteckigen sowie kreisrunden z-Pins verstärkt waren. Zusammen mit zusätzlichen Untersuchungen an unverpinnten Prüfkörpern ergaben sich damit die in Tabelle 3.10 dargestellten Versuchsreihen.

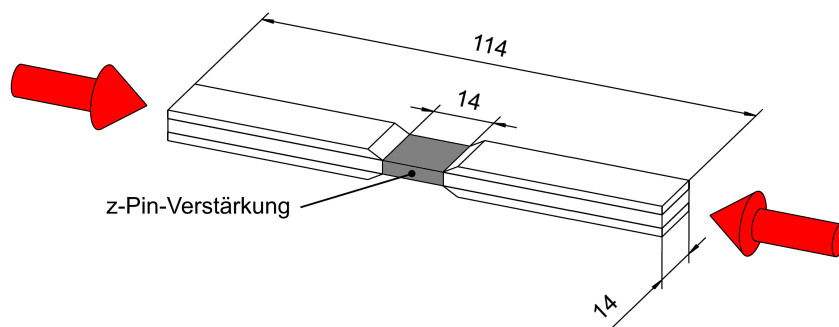


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung der verwendeten Prüfkörper zur Bestimmung der Druckeigenschaften



Die quasi-statischen Untersuchungen wurden mithilfe einer servohydraulischen Prüfmaschine (MTS 810) mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min durchgeführt. Alle Prüfkörper wurden bis zum Bruch belastet und während des Versuchs die resultierende Kraft aufgezeichnet. Aufgrund der Knickgefährdung der schlanken Prüfkörper war die freie Länge zwischen den Einspannelementen stark limitiert. Die daraus resultierenden engen Bauraumverhältnisse zwischen den Kolben der Prüfmaschine ließen den Einsatz eines physischen Extensometers nicht zu. Die Erfassung der Längenänderung der Proben erfolgte daher über ein 2D Bildkorrelationsmesssystem (Fa. ISI-Sys GmbH) mit monochromer 5MP Industriekamera. Dazu wurde vor der Prüfung auf den Proben ein kontrastreiches Specklemuster aufgebracht, welches während des Versuchs in Einzelbildern mit einer Bildaufnahmefrequenz von 0,5 Hz aufgenommen wurde. Im Anschluss an die Versuche wurde aus diesen Bildern mithilfe der Bildauswertesoftware VIC-2D (correlated SOLUTIONS) die Dehnung der Proben während des Versuchs ermittelt.

Tabelle 3.10: Versuchsplan zur Untersuchung der mechanischen Druckeigenschaften

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt	Beanspruchungsniveaus
UD	-	-	0,0 %	90 %, 86 %, 83 %, 80 %
UD	eckig	längs	0,5 %	94 %, 92 %, 90 %, 88 %
UD	eckig	längs	1,0 %	90 %, 88 %, 86 %, 84 %
UD	eckig	längs	2,0 %	92 %, 90 %, 87 %, 85 %
UD	eckig	quer	2,0 %	90 %, 86 %, 84 %, 82 %
UD	rund	-	2,0 %	96 %, 94 %, 92 %, 90 %
QI	-	-	0,0 %	94 %, 90 %, 85 %, 80 %
QI	eckig	längs	0,5 %	96 %, 94 %, 92 %, 90 %
QI	eckig	längs	1,0 %	98 %, 96 %, 94 %, 90 %
QI	eckig	längs	2,0 %	98 %, 96 %, 94 %, 90 %
QI	eckig	quer	2,0 %	90 %, 88 %, 86 %, 84 %
QI	rund	-	2,0 %	98 %, 96 %, 94 %, 90 %

Die synchrone Aufnahme von Bild- und Lastdaten ermöglichte die Berechnung des Druckelastizitätsmoduls  $E_D$  jeder Probe. Diese erfolgte gemäß DIN EN ISO 14126 [101] als Sekantenmodul in einem Dehnungsbereich zwischen 0,05 % und 0,25 % analog Formel 3.12 zur Bestimmung des Zugmoduls. Zusätzlich zur Steifigkeit wurde ebenfalls die Druckfestigkeit  $R_D$  jeder Probe ermittelt. Für jede Versuchsreihe wurden fünf Prüfkörper getestet und ausgewertet.

Der Einfluss der z-Pin-Verstärkung auf das Ermüdungsverhalten der Prüfkörper unter Druckbelastung wurde anhand kraftgesteuerter Dauerschwingversuche ermittelt. Dazu wurden die Proben mit einer schwingenden, sinusförmigen Druck-Schwell-Belastung mit einem Verhältnis von minimaler Beanspruchung  $\sigma_u$  zu maximaler Beanspruchung  $\sigma_o$  von 0,6 und einer Prüffrequenz von 5 Hz bis zum Bruch belastet. Bei Prüfkörpern, die im Dauerschwingversuch nicht versagt haben, wurde die Prüfung nach  $10^6$  Schwingspielen abgebrochen. Auch im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Lebensdauerkurven im Einstufenversuch ermittelt und auf insgesamt vier Beanspruchungsniveaus je Testreihe geprüft. Auf jedem Beanspruchungsniveau wurden dabei drei Prüfkörper untersucht. Die maximalen Beanspruchungen jedes Lastniveaus  $\sigma_o$  sind in Tabelle 3.10 dargestellt und wurden aus der zuvor ermittelten mittleren Druckfestigkeit jeder Versuchsreihe errechnet. Die Auswertung der erzielten Lebensdauerkurven erfolgte analog dem in Abschnitt 3.5.4 beschriebenen Vorgehen zum Ermüdungsverhalten unter Zugbelastung.

## 4 Ergebnisdarstellung und -auswertung

Gegenstand des folgenden Kapitels ist die Darstellung und Beschreibung der in den experimentellen, mikrostrukturellen und numerischen Untersuchungen erzielten Ergebnisse. Der Fokus der anschließenden Ergebnisauswertung liegt dabei auf der Gegenüberstellung der Unterschiede im Verhalten rechteckiger und kreisrunder z-Pins sowie der Identifizierung der hierfür verantwortlichen Mechanismen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet und auf Plausibilität überprüft.

### 4.1 Mikrostruktur

#### 4.1.1 Faserwelligkeit

In Abbildung 4.1 sind Mikroskopaufnahmen eines kreisrunden sowie längs bzw. quer ausgerichteter rechteckiger z-Pins in einem unidirektionalen Prüfkörper zusammen mit den ausgelenkten Verstärkungsfasern des Grundlaminats dargestellt. Anhand der Schliffbilder ist das Ausweichen der Fasern in der x-y-Ebene, um das Eindringen der Pins zu ermöglichen, deutlich zu erkennen. In vielen Fällen konnte dabei aufgrund der nicht exakten Ausrichtung der Pinreihen zu den Verstärkungsfasern des Grundlaminats eine asymmetrische Faserwelligkeit festgestellt werden.

In Abhängigkeit von der Pin geometrie und der Ausrichtung der rechteckigen Pins führt die Einbringung von z-Pins in den Werkstoff zu deutlichen Unterschieden in den gemessenen Faserwelligkeitswinkeln  $\Theta$ . In unidirektionalen Laminaten beträgt der mittlere Faserwelligkeitswinkel bei Verwendung von kreisrunden z-Pins  $11,7 \pm 1,7^\circ$ . Für rechteckige z-Pins beträgt dieser je nach Ausrichtung im Laminat  $8,9 \pm 1,1^\circ$  (längs) bzw.  $12,2 \pm 1,7^\circ$  (quer). Die gemessenen Winkel liegen damit zum Teil deutlich oberhalb des in der wissenschaftlichen Literatur für kreisrunde z-Pins ( $\varnothing 0,51 \text{ mm}$ ) angegebenen maxima-

len Faserwelligkeitswinkels von  $7,0^\circ$  [37]. Da die Höhe des Faserwelligkeitswinkels neben dem Pindurchmesser jedoch stark von den Eigenschaften des verwendeten Prepregs, wie Fasersteifigkeit, Faservolumengehalt oder Harzviskosität abhängig ist, können die erzielten Ergebnisse, insbesondere vor dem Hintergrund der festgestellten asymmetrischen Faserwelligkeit, als plausibel betrachtet werden.

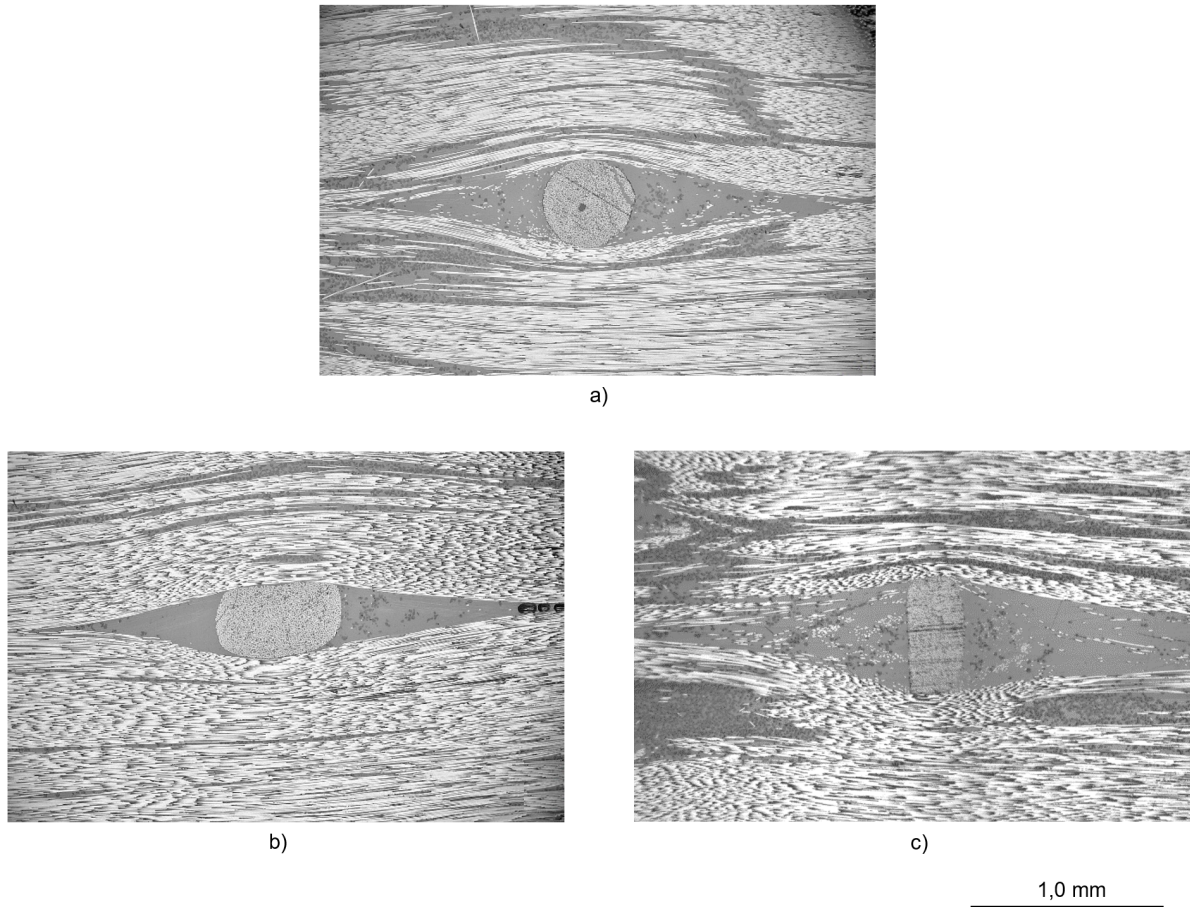


Abbildung 4.1: Faserumlenkungen an einem (a) kreisrunden, (b) längs ausgerichteten rechteckigen und (c) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pin in einem UD-Laminat

Abbildung 4.2 zeigt die Faserumlenkungen für runde sowie rechteckige z-Pins in einem quasi-isotropen Laminat. Zusätzlich zur Ausrichtung der rechteckigen Pins längs und quer zur Orientierung der Verstärkungsfasern, treffen hier Fasern und z-Pins in den entsprechenden Lagen in einem  $45^\circ$ -Winkel aufeinander. Auch in quasi-isotrop aufgebauten FKV sind die Faserwelligkeitswinkel für rechteckige Pins, die längs zur Faserrichtung ausgerichtet sind, mit  $8,9 \pm 1,1^\circ$  am geringsten. Die Faserwelligkeitswinkel für kreisrunde bzw. rechteckige z-Pins, die unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur Faserrichtung orientiert sind, betragen  $11,1 \pm 1,4^\circ$  bzw.  $12,5 \pm 1,9^\circ$ . Mit  $13,4 \pm 1,6^\circ$  wurde die größte Faserwelligkeit für quer aus-

gerichtete rechteckige z-Pins ermittelt. Der Vergleich der Faserwelligkeitswinkel zwischen den beiden untersuchten Laminataufbauten zeigt, dass die sich im Werkstoff einstellenden Faserwelligkeitswinkel nicht vom Lagenaufbau des verwendeten FKV-Werkstoffs abhängen. Eine gegenseitige Beeinflussung unterschiedlich orientierter benachbarter Faserlagen liegt daher nicht vor.

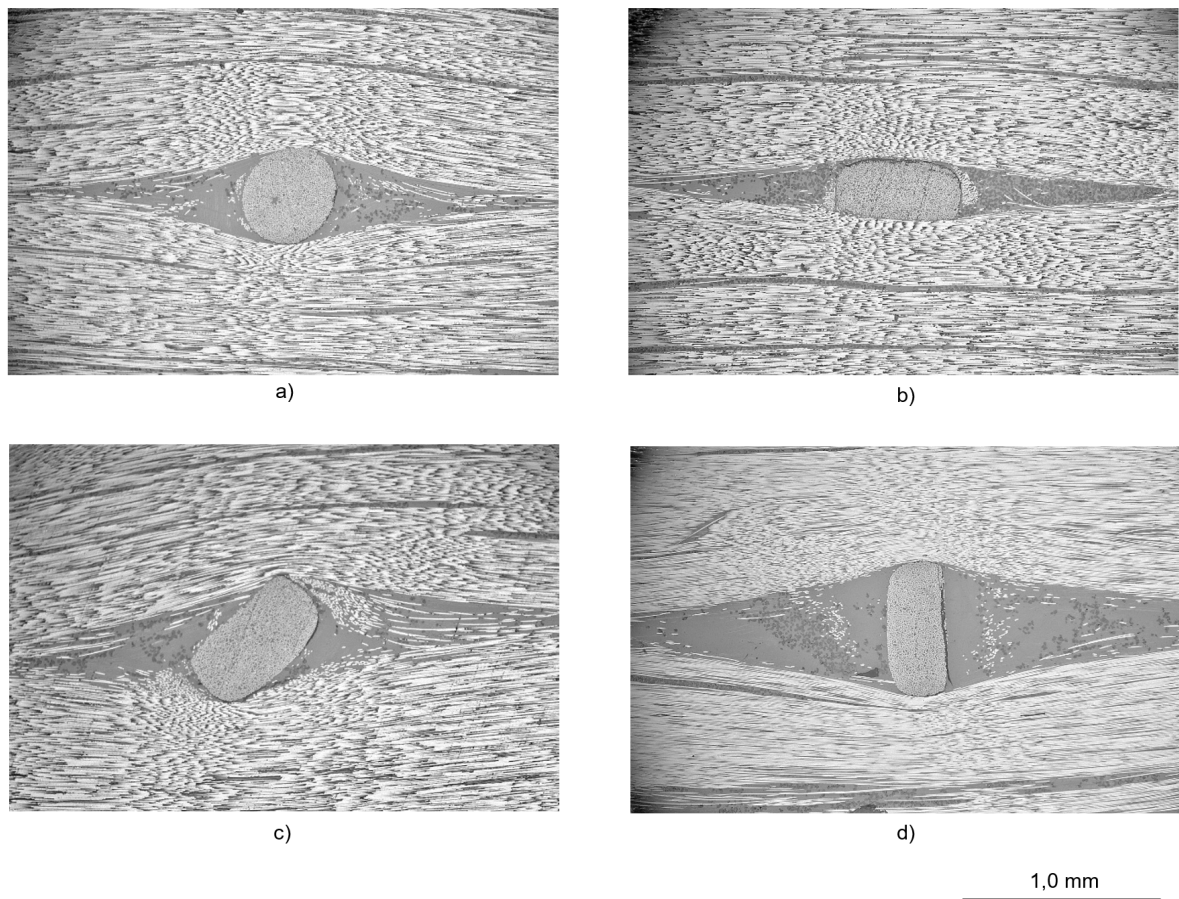


Abbildung 4.2: Faserumlenkungen in quasi-isotropen Laminaten an einem (a) kreisrunden z-Pin sowie an rechteckigen z-Pins in einer (b) 0°-, (c) 45°- und (d) 90°-Faserlage

Beim Einsatz kreisrunder z-Pins wird bis zu einem Durchmesser von 1,0 mm im Allgemeinen von einer linearen Zunahme des Faserwelligkeitswinkels mit steigendem Pindurchmesser berichtet [3]. Die Sensibilität von  $\Theta$  gegenüber einer Durchmessererhöhung der Pins ist dabei von den Eigenschaften des verwendeten Prepregmaterials abhängig [3]. Um diese Abhängigkeit im Zusammenhang mit kreisrunden und rechteckigen z-Pins untersuchen zu können, muss an dieser Stelle, aufgrund der unterschiedlichen Pingeometrien, der Parameter der Störbreite  $b_s$  eingeführt werden. Die Störbreite entspricht dabei der projizierten Breite des Pins in Faserrichtung der jeweiligen Einzellage. Die Abhängigkeit des Faserwelligkeitswinkels von der Störbreite in quasi-isotropen sowie unidirektionalen Laminaten ist

in Abbildung 4.3 dargestellt. Auch bei Verwendung von unterschiedlichen Pingeometrien stellt sich demnach ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Störbreite und der Höhe des Faserwelligkeitswinkels ein.

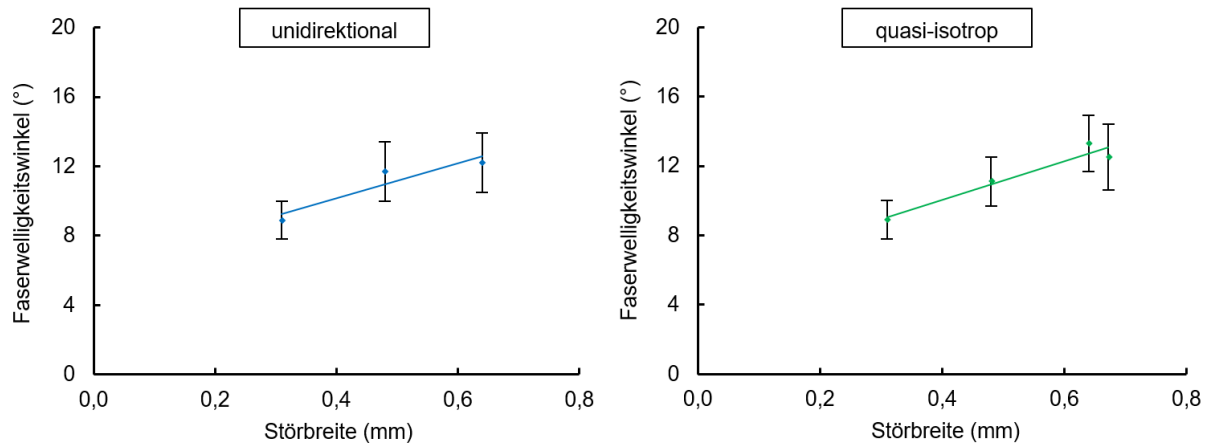


Abbildung 4.3: Abhängigkeit der Faserwelligkeitswinkel von der Störbreite der verwendeten z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten

Die exakte Ausdehnung der Faserwelligkeitszone ist aufgrund des nicht eindeutig definierbaren Übergangs zu den Fasern des ungestörten Laminats sowie der gegenseitigen Beeinflussung der im Laminat befindlichen z-Pins schwer zu bestimmen. Auf eine quantitative Auswertung der Faserwelligkeitszone wird daher im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Aufgrund der Beobachtung von Mouritz [5], der für kreisrunde z-Pins von einem linearen Zusammenhang zwischen dem Pindurchmesser und der Größe der Faserwelligkeitszone berichtet, ist jedoch auch für unterschiedliche Pingeometrien eine Vergrößerung der Faserwelligkeitszone mit zunehmender Störbreite der Pins wahrscheinlich.

### 4.1.2 Inklination

Abbildung 4.4 zeigt je einen Längsschnitt durch einen kreisrunden und rechteckigen z-Pin in einem quasi-isotropem Laminat. Deutlich zu erkennen ist die Auslenkung beider Pins aus der angestrebten senkrechten Position. Dabei unterliegt der Inklinationswinkel  $\Phi$  der in einen Prüfkörper eingebrachten z-Pins unabhängig vom Laminataufbau und der Geometrie der Pins einer starken Schwankung, sodass die gemessene Schrägstellung der Pins auch innerhalb einer Probe über einen weiten Winkelbereich gestreut ist.

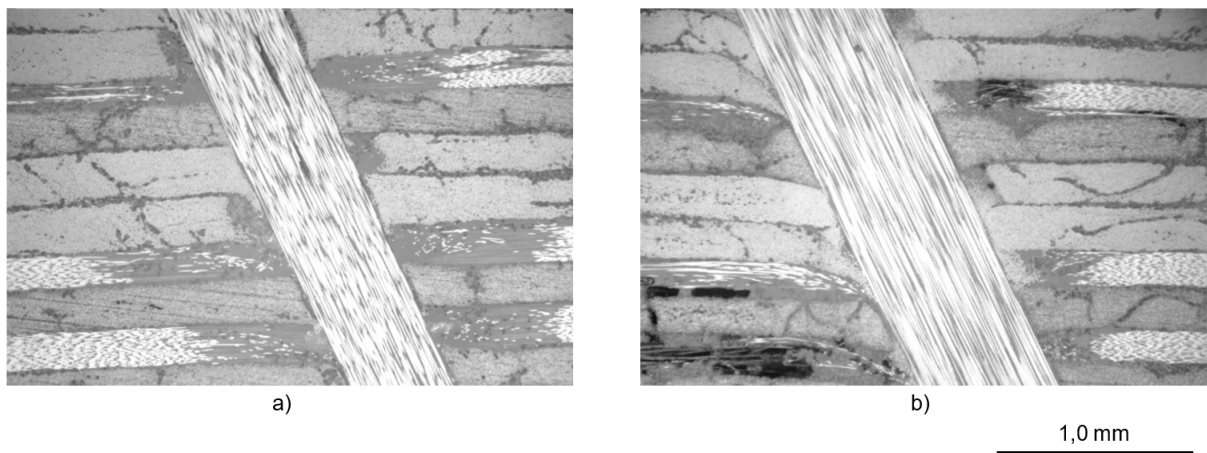


Abbildung 4.4: Darstellung der Inklination anhand eines (a) kreisrunden und (b) rechteckigen z-Pins in einem quasi-isotropen Laminat

In Abbildung 4.5 ist dazu die statistische Verteilung der gemessenen Inklinationenwinkel längs im Laminat ausgerichteter rechteckiger sowie kreisrunder z-Pins in unidirektionalem und quasi-isotropem Laminat dargestellt. Die Inklinationenwinkel beider Pingeometrien sind dabei unabhängig vom Laminataufbau annähernd normalverteilt. Unterschiede zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins lassen sich daher vor allem im Hinblick auf die mittleren Inklinationenwinkel feststellen. In UD-Laminaten liegt dieser für rechteckige Pins mit  $21,2 \pm 4,2^\circ$  spürbar über dem kreisrunder z-Pins mit  $15,4 \pm 4,8^\circ$ . In den quasi-isotrop aufgebauten Prüfkörpern zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Die mittleren Inklinationenwinkel liegen hier mit  $14,6 \pm 3,8^\circ$  für rechteckige und  $17,7 \pm 4,0^\circ$  für kreisrunde Pins deutlich näher beisammen. Zudem weisen kreisrunde z-Pins gegenüber rechteckigen Pins, im Gegensatz zu den Beobachtungen in UD-Laminaten, eine geringfügig größere Schrägstellung auf.

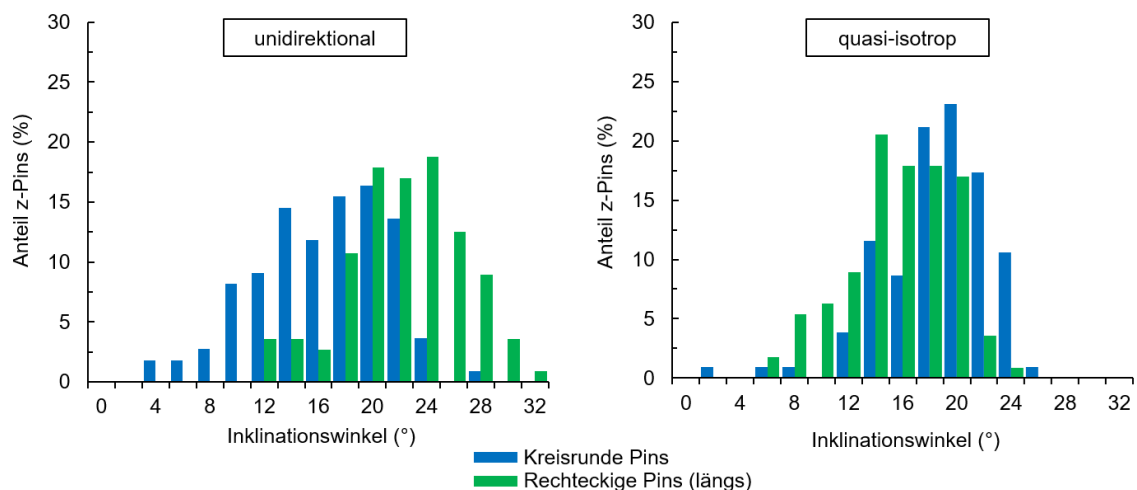


Abbildung 4.5: Inklinationenwinkelverteilung kreisrunder und rechteckiger z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten



In unidirektionalen FKV wurde bei der Untersuchung der Inklination rechteckiger z-Pins zusätzlich nach der Ausrichtung der Pins im Werkstoff unterschieden. Abbildung 4.6 zeigt die Verteilung der Inklinationswinkel von längs bzw. quer zur Faserrichtung des Laminats ausgerichteten rechteckigen z-Pins. Quer ausgerichtete z-Pins weisen in unidirektionalen Laminaten demnach mit  $22,5 \pm 5,1^\circ$  gegenüber längs ausgerichteten z-Pins nur geringfügig größere Schrägstellungswinkel auf. Ein signifikanter Unterschied im Kippverhalten zwischen längs und quer zur Faserrichtung ausgerichteten rechteckigen z-Pins konnte daher nicht festgestellt werden.

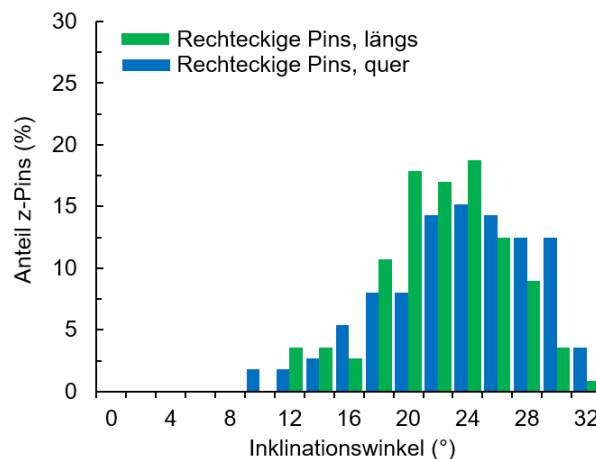


Abbildung 4.6: Inklinationswinkelverteilung längs und quer ausgerichteter rechteckiger z-Pins in unidirektionalen Laminaten

Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Inklinationswinkel liegen unabhängig von der Pingeometrie unterhalb der von Chang et al. [6, 41] für kreisrunde z-Pins ( $\varnothing 0,5\text{ mm}$ ) festgestellten mittleren Inklination von  $23^\circ$ . Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, trägt der Prozessschritt der Aushärtung des verpinnten Laminats im Autoklaven den größten Beitrag zur Entstehung des resultierenden Inklinationswinkels bei. Aufgrund des aufgebrachten Drucks kippen die eingebrachten z-Pins während des Aushärtevorgangs um ihre geschäftete Spitze und führen so nochmal zu einer deutlichen Erhöhung der Inklinationswinkel nach dem Abscherprozess. Im Gegensatz zu der häufig im Laminat verbleibenden Pinspitze wurden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten z-Pins bei der Prüfkörperherstellung vollständig durch das Laminat getrieben und anschließend auf beiden Seiten abgeschert. Die dadurch entstandene beidseitig plane Stirnfläche der z-Pins könnte somit für eine Verminderung der während des Aushärtevorgangs entstehenden Schrägstellung der z-Pins und damit zu einer Reduzierung des gesamten Inklinationswinkels geführt haben. Die breite Streuung sowie die Normalverteilung der Inklinationswinkel deckt sich hingegen mit den Beobachtungen von Chang et al. [6, 41].



Die Höhe der Beiträge der einzelnen Herstellungsschritte an der Entstehung des Gesamtinklinationswinkels konnte anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht ermittelt werden. Die getrennte Berechnung der Winkelkomponenten in x- und y-Richtung hat jedoch gezeigt, dass sich die Pins, unabhängig von der Pingeometrie, deutlich stärker in die Richtung neigen, in die der Abscherprozess im Anschluss an die Pineinbringung erfolgte.

### 4.1.3 Pin-Laminat-Grenzfläche

Der Einsatz verschiedener Pingeometrien führt in beiden untersuchten Laminataufbauten zu deutlichen Unterschieden hinsichtlich der Ablöseerscheinungen in der Grenzfläche zwischen Pin und Laminat im Anschluss an den Aushärtprozess. Abbildung 4.7 zeigt dazu zunächst die Grenzflächensituation für kreisrunde sowie längs und quer ausgerichtete rechteckige z-Pins in einem unidirektionalen Laminat. Obwohl die Ausdehnung der entstandenen Grenzflächenrisse von Pin zu Pin einer gewissen Schwankung unterliegt, lassen sich dennoch charakteristische Ablösemuster für beide Pingeometrien beschreiben. Kreisrunde z-Pins zeigen demnach häufig Ablöseerscheinungen in den Bereichen, in denen sie mit der harzreichen Zone in Kontakt stehen. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Begutachtung der Grenzfläche zwischen Laminat und längs ausgerichteten rechteckigen Pins. Auch bei diesen ist lediglich der Bereich, der den harzreichen Zonen zugewandt ist, von Ablösungen betroffen. Aufgrund der veränderten Seitenverhältnisse zwischen runden und rechteckigen z-Pins führt dies jedoch zu einer deutlichen Erhöhung des intakten Anteils der Pin-Laminat-Grenzfläche.

Auch für quer ausgerichtete rechteckige z-Pins konnte eine Ablösung der Pins vom Laminat in den Bereichen des Pins, die in die harzreiche Richtung weisen, festgestellt werden. Bei diesen Pins sind jedoch in der Regel nicht beide Seiten gleichermaßen von Grenzflächenrissen betroffen. Stattdessen konnten Grenzflächenschädigungen häufig lediglich an einer der mit der Harzzone in Kontakt stehenden Seiten der Pins beobachtet werden, während die gegenüberliegende Fläche mit dem Laminat verbunden bleibt.

In Abbildung 4.8 ist das Ablöseverhalten kreisrunder und rechteckiger z-Pins in quasi-isotropen FKV anhand von charakteristischen Mikroskopaufnahmen dargestellt. Im Vergleich zu den Beobachtungen in UD-Laminaten unterscheidet sich das Ablöseverhalten der z-Pins in quasi-isotropen FKV deutlich. Im Anschluss an den Abkühlprozess sind die untersuchten kreisrunden z-Pins nahezu vollständig vom umliegenden Laminat abgelöst.

Im Gegensatz dazu versagt die Pin-Laminat-Grenzfläche bei rechteckigen z-Pins lediglich entlang einer der längeren Kanten der z-Pins. Die drei übrigen Kanten des Pins bleiben mit dem umliegenden Laminat verbunden. Der Riss verläuft daher nicht wie erwartet entsprechend der Lage der Harzzonen schraubenförmig um den Pin, sondern verbleibt, unabhängig von der Faserorientierung der jeweils betrachteten Lage, auf derselben Seite des Pins. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung liefert die besondere Geometrie der Pin-Laminat-Grenzfläche. Während der Riss an kreisrunden z-Pins ungestört und ohne plötzliche Richtungsänderung spiralförmig um den Pin herum fortschreiten kann, wäre für ein solches Verhalten bei rechteckigen Pins an den Ecken des Querschnitts eine scharfe Umlenkung des Risses um jeweils  $90^\circ$  notwendig. Das Risswachstum findet daher vorzugsweise geradlinig entlang einer Pinkante statt und wird, anders als bei kreisrunden Pins, nicht durch die Faserorientierung der jeweiligen Einzelschicht beeinflusst.

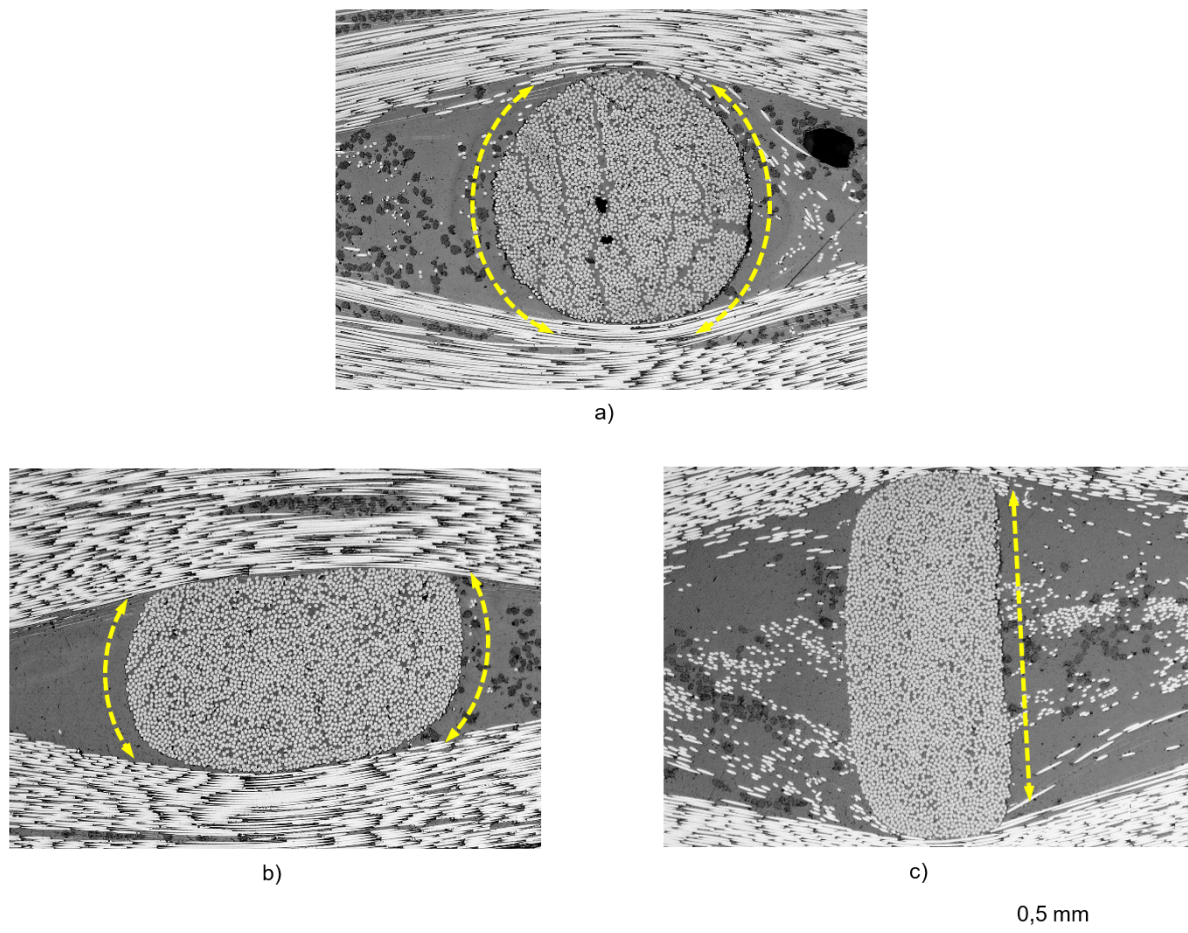


Abbildung 4.7: Charakteristische Grenzflächenschädigungen a) kreisrunder, b) längs ausgerichteter rechteckiger und c) quer ausgerichteter rechteckiger z-Pins in unidirektionalen Laminaten. Grenzflächenrisse sind gelb markiert.

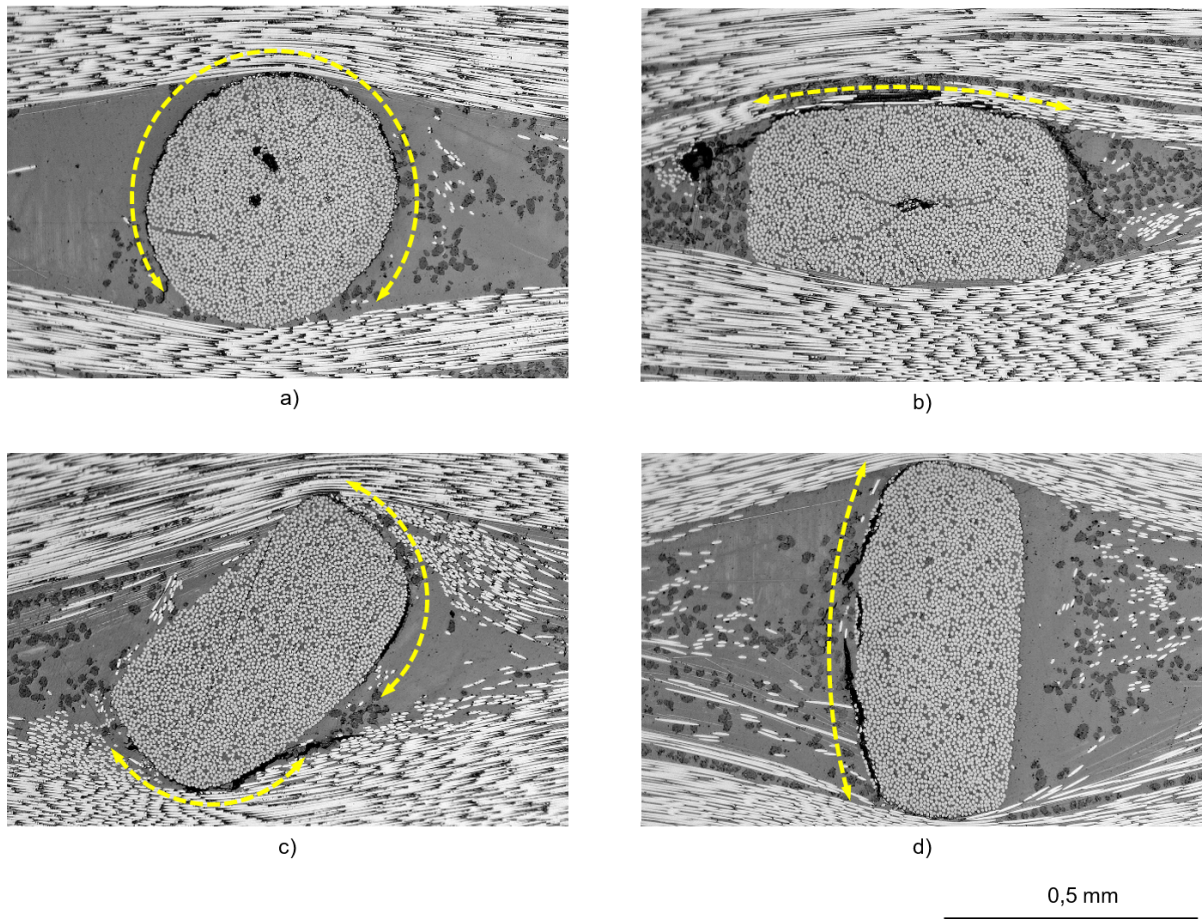


Abbildung 4.8: Charakteristische Grenzflächenschädigungen zwischen quasi-isotropen Laminaten und (a) kreisrunden z-Pins sowie rechteckigen z-Pins in einer (b) 0°-, (c) 45°- und (d) 90°-Faserlage. Grenzflächenrisse sind gelb markiert.

Analog zu den rechteckigen z-Pins in unidirektionalen FKV führt das beschriebene Ablöseverhalten auch in QI-Laminaten zu einer deutlichen Erhöhung der intakten Grenzfläche gegenüber kreisrunden z-Pins. Der Unterschied im Ablöseverhalten zwischen beiden Pin-geometrien fällt jedoch, aufgrund der beobachteten nahezu vollständigen Ablösung der kreisrunden Pins, deutlich größer aus.

### 4.1.4 Orientierung rechteckiger z-Pins im Laminat

Die Untersuchung der Mikrostruktur hat zusätzlich zu den dargestellten Ergebnissen gezeigt, dass nicht alle rechteckigen z-Pins in ihrer angestrebten Orientierung im ausgehärteten Laminat vorliegen. Abbildung 4.9 zeigt dazu beispielhaft die nach der Aushärtung vorliegende Ausrichtung ursprünglich quer zur Faserrichtung eingebrachter rechteckiger z-Pins in einem UD-Laminat. Aufgrund ihrer nicht rotationssymmetrischen Querschnittsform unterliegen rechteckige Pins in unidirektionalen Laminaten abhängig von ihrer angestrebten Ausrichtung im Werkstoff unterschiedlich hohen Eindringwiderständen. Obwohl die Pins während der Einbringung durch die Schaumpreform geführt werden sollten, hat die stichprobenartige Auswertung von Schliffproben gezeigt, dass sich etwa die Hälfte der ursprünglich quer zur Faserrichtung ausgerichteten rechteckigen Pins während des Insertionsprozesses um ihre z-Achse drehen und so versuchen dem größeren Eindringwiderstand auszuweichen. Der Großteil der gedrehten Pins liegt dabei im ausgehärteten Laminat ideal längs ausgerichtet vor und lediglich eine äußerst geringe Anzahl von z-Pins weist einen zufälligen Winkel zwischen dem ideal längs bzw. ideal quer ausgerichteten Zustand auf.

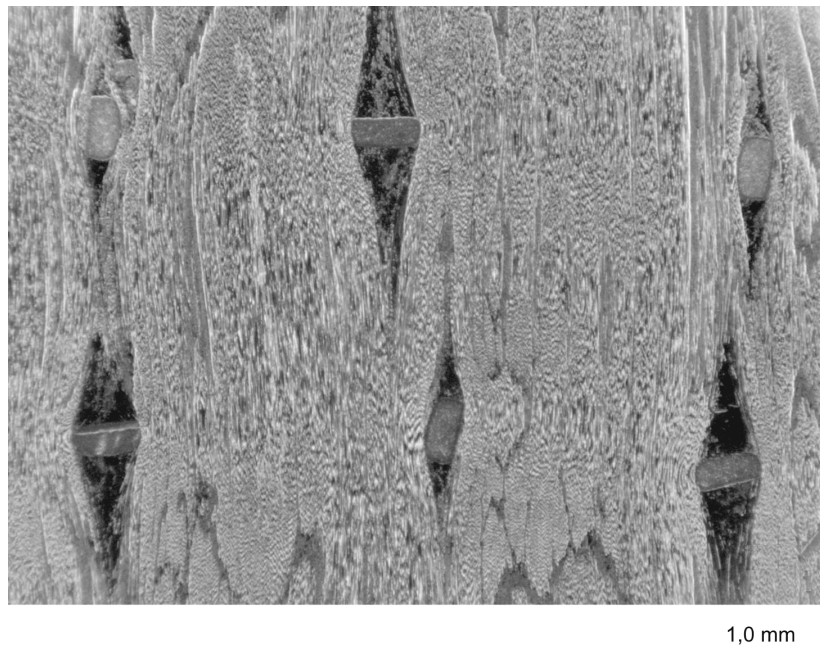


Abbildung 4.9: Überblick über die Drehung einiger nominell quer in den Werkstoff eingebrachter rechteckiger z-Pins in einem UD-Laminat

Aufgrund des ausgeglichenen Lagenaufbaus der quasi-isotropen Prüfkörper ist der Eindringwiderstand in diesen Werkstoffen unabhängig von der Ausrichtung der Pins zum Laminat. Folgerichtig konnte in QI-Laminaten keine Drehung der rechteckigen Pins um ihre z-Achse beobachtet werden.



## 4.2 Numerische Untersuchungen des Ablöseverhaltens

Während des Abkühlprozesses im Anschluss an die Autoklavaushärtung bilden sich Wärmeeigenspannungen in der Pin-Laminat-Grenzfläche aus, die zu den zuvor gezeigten Rissen zwischen z-Pins und Grundlaminat führen. Die Ergebnisse der durchgeführten numerischen Untersuchungen zeigen, dass dieses Verhalten überwiegend auf Zugspannungen, die senkrecht zur Ebene der Kohäsivelemente wirken, zurückzuführen ist. In der Grenzfläche entstehende Schubspannungen spielen hingegen für die Ausbildung von Grenzflächenschädigungen nahezu keine Rolle. In Abbildung 4.10 und 4.11 sind daher ausschließlich die wirkenden Normalspannungen ( $S_{33}$ ) in der Kohäsivzone kurz vor dem Versagen der ersten Grenzflächenelemente für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen FKV dargestellt.

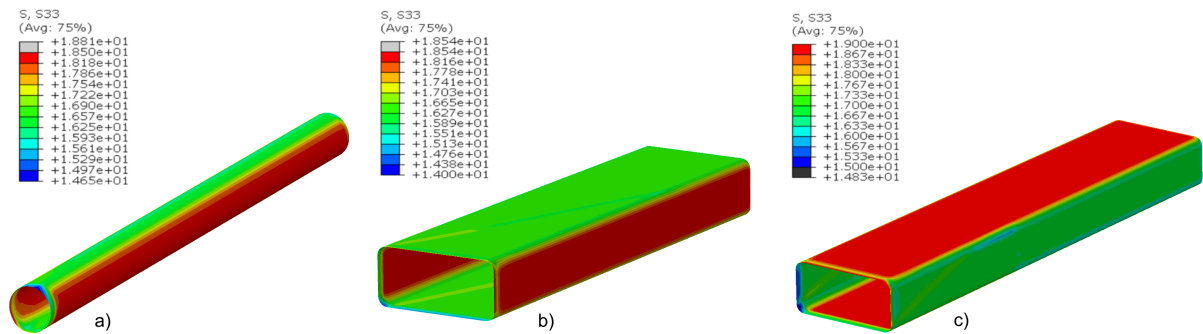


Abbildung 4.10: Numerisch ermittelte Grenzflächenspannungen zwischen (a) kreisrunden, (b) längs ausgerichteten rechteckigen sowie (c) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins und unidirektionalen Laminaten

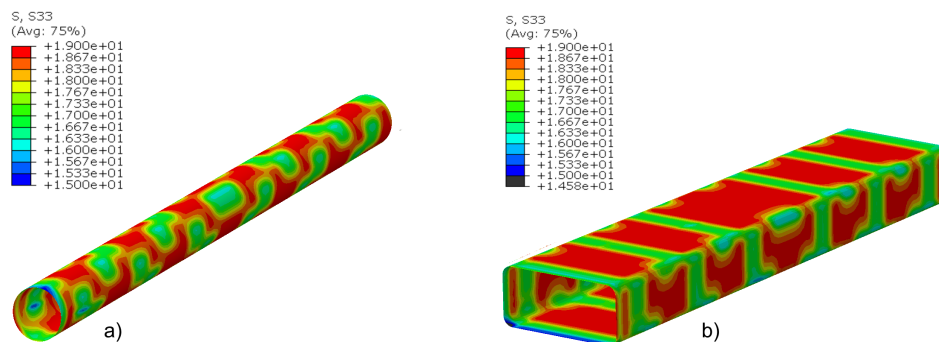


Abbildung 4.11: Numerisch ermittelte Grenzflächenspannungen zwischen (a) kreisrunden sowie (b) rechteckigen z-Pins und quasi-isotropen Laminaten

Unabhängig von der Pingeometrie und dem Laminataufbau bilden sich dabei vor allem in den Bereichen hohe Grenzflächenspannungen aus, in denen der Pin mit der harzreichen Zone in Kontakt steht. Aufgrund der wechselnden Faserrichtung der Einzellagen ergibt sich daraus für z-Pins in quasi-isotropen FKV ein Spannungsbild, in dem die Bereiche erhöhter Grenzflächenspannungen schraubenförmig um den Pin verlaufen. Die Spannungsverteilung in der Pin-Laminat-Grenzfläche deckt sich damit qualitativ mit den Ergebnissen vergleichbarer Untersuchungen zu kreisrunden z-Pins [10–12]. Das verwendete Einheitszellenmodell kann daher für die nachfolgende Betrachtung der Grenzflächenschädigungen als plausibel betrachtet werden.

Die dargestellte Verteilung der Grenzflächenspannungen ist auf die stark richtungsabhängigen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe zurückzuführen. Aufgrund der unterschiedlichen Faserorientierung von z-Pin und umgebendem Laminat findet eine unterschiedlich starke Kontraktion beider Komponenten in die harzreiche Richtung jeder Einzelschicht statt. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient des Laminats in Faserichtung überwiegend von den Eigenschaften der Verstärkungsfasern bestimmt wird, weist dieses in 0°-Richtung jeder Einzellage einen geringfügig negativen WAK auf. Demgegenüber steht in diese Richtung eine deutlich positive Wärmedehnung des z-Pins, die während der Abkühlung von der Aushärtetemperatur zu einer Kontraktion des Pins und damit zu den beschriebenen Zugspannungen senkrecht zur Pin-Laminat-Grenzfläche führt.

Wird die Temperatur vom oben dargestellten Zustand weiter verringert, führen die beschriebenen Spannungen in der Grenzfläche nach Überschreiten ihrer Beanspruchbarkeit zunächst zu einer Erweichung der Kohäsivelemente und anschließend zu Grenzflächenschädigungen zwischen Pin und Laminat. Dabei kann anhand der Ergebnisse der durchgeführten numerischen Simulation gezeigt werden, dass der Anteil der versagten Grenzflächenelemente nicht nur vom Aufbau des Laminats, sondern ebenfalls stark von der Pingeometrie abhängig ist. In Abbildung 4.12 ist dazu zunächst die Elementschädigung ( $S_{DEG}$ ) in der Pin-Laminat-Grenzfläche im Anschluss an die vollständige Abkühlung auf Raumtemperatur für kreisrunde z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen FKV dargestellt. Ab einer Elementschädigung von 1,0 gelten die Kohäsivelemente als versagt und können keine Kräfte mehr zwischen dem Pin und dem umliegenden Laminat übertragen.

Aufgrund der hohen Grenzflächenspannungen in die harzreiche Richtung kommt es zwischen kreisrunden z-Pins und unidirektionalen FKV zu einer örtlich begrenzten Ablösung in den entsprechenden Bereichen der Pins, die in die harzreiche Richtung des Laminats weisen. Auch in quasi-isotropen Laminaten beginnt das Versagen der Grenzfläche zunächst in den Bereichen des Pins, die in die harzreiche Richtung der jeweiligen Einzelschicht weisen.

Die numerische Untersuchung hat jedoch gezeigt, dass sich die Grenzflächenschädigungen mit fortschreitender Abkühlung weiter ausbreiten, bis nach vollständiger Abkühlung auf Raumtemperatur nahezu der gesamte z-Pin vom Laminat abgelöst ist und nur noch wenige Bereiche des Pins mit dem Laminat verbunden bleiben.

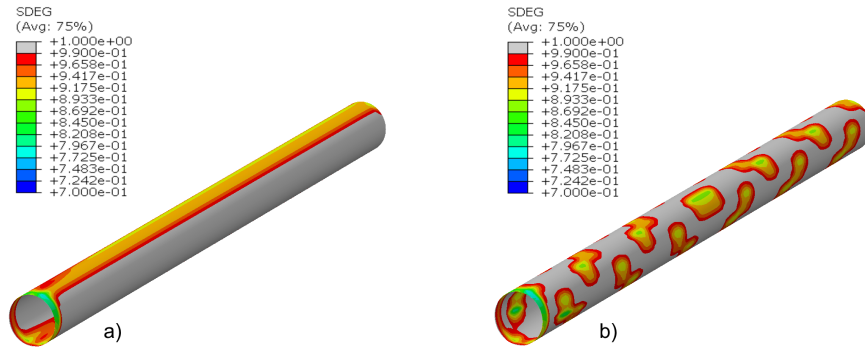


Abbildung 4.12: Numerisch ermittelter Grenzflächenzustand an kreisrunden z-Pins in (a) unidirektionalen und (b) quasi-isotropen Laminaten. Vollständig versagte Grenzflächenelemente sind in grau dargestellt.

In Abbildung 4.13 sind die Ergebnisse der FE-Untersuchungen hinsichtlich der Grenzflächenschädigungen zwischen längs bzw. quer ausgerichteten rechteckigen Pins und unidirektionalen Laminaten sowie rechteckigen z-Pins und quasi-isotropen FKV dargestellt. Demnach zeigen rechteckige z-Pins gegenüber kreisrunden Pins ein kaum abweichendes Ablöseverhalten vom Laminat. Auch für rechteckige Pins zeigen die Simulationsergebnisse in unidirektionalen FKV lediglich in den Bereichen der z-Pins Ablösungen, die in die harzreiche Richtung des Laminats weisen. Aufgrund ihrer Querschnittsform verändert sich dabei jedoch, je nach Ausrichtung des Pins, der Anteil der Pinoberfläche, der im Anschluss an den Abkühlprozess vollständig vom Grundlaminat abgelöst ist. Für quasi-isotrope FKV weisen die Ergebnisse der numerischen Untersuchung hingegen, analog der kreisrunden Pins, auf eine großflächige Ablösung der rechteckigen z-Pins und lediglich wenige Bereiche der Pins, die mit dem Laminat verbunden bleiben, hin.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der FE-Analyse mit den in Abschnitt 4.1.3 dargestellten Grenzflächenschädigungen zeigt, dass das simulierte Ablöseverhalten der z-Pins nicht für alle Pingeometrien und -ausrichtungen mit den Erkenntnissen der Mikrostrukturuntersuchungen übereinstimmt. Während für kreisrunde z-Pins eine gute Übereinstimmung zwischen der numerischen Simulation und den gezeigten Mikroskopaufnahmen des Grenzflächenzustands erzielt werden konnte, trifft dies in Verbindung mit rechteckigen z-Pins nur für längs ausgerichtete Pins in unidirektionalen Laminaten zu. In den Mikrostrukturuntersuchungen konnten, entgegen der beschriebenen Simulationsergebnisse, an quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins in unidirektionalen Laminaten sowie rechte-

ckigen Pins in quasi-isotropen FKV lediglich an einer der vier Seiten der Pins Grenzflächenschädigungen nachgewiesen werden. Diese Diskrepanz ist dabei vermutlich auf eine in der numerischen Untersuchung bisher nicht berücksichtigte unterschiedlich hohe Grenzflächenfestigkeit an den Seiten der z-Pins, welche der Reinharzzone des Laminats zugewandt sind, zurückzuführen.

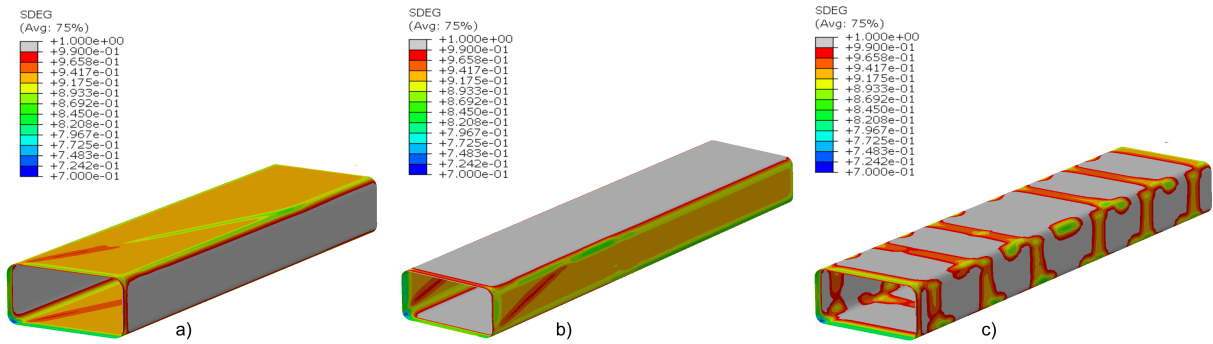


Abbildung 4.13: Numerisch ermittelter Grenzflächenzustand an (a) längs ausgerichteten und (b) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins in unidirektionalen Laminaten sowie (c) rechteckigen z-Pins in quasi-isotropen Laminaten. Vollständig versagte Grenzflächenelemente sind in grau dargestellt.

Während des Aushärtprozesses im Autoklaven werden die durch die Faserwelligkeit hervorgerufenen Hohlräume im Laminat mit Harz gefüllt. Gelingt das Matrixharz bevor der komplette Bereich gefüllt werden konnte, kommt es zu einer regelmäßig beobachteten Bildung von Luftpinschlüssen in den harzreichen Zonen des Laminats [41]. Aufgrund der Größe der harzreichen Zone ist die Gefahr der Bildung solcher Luftpinschlüsse gerade in den Laminatschichten, in welchen die Fasern auf einen quer ausgerichteten rechteckigen z-Pin treffen, besonders hoch. Bilden sich solche Fehlstellen an der Grenzfläche zwischen Pin und Laminat aus, wird diese gegenüber einer fehlerfreien Anbindung geschwächt und versagt dadurch bereits bei niedrigeren Spannungen. Durch die unterschiedlichen Grenzflächenfestigkeiten ist es daher möglich, dass sich eine Pinseite geringfügig früher vom Laminat ablöst und damit die gegenüberliegende Seite derart entlastet, dass diese mit dem Laminat verbunden bleibt.

Im Rahmen der numerischen Simulation konnte das in den Mikrostrukturuntersuchungen beobachtete Ablöseverhalten rechteckiger z-Pins daher durch die Berücksichtigung einer geringen Abweichung in der Grenzflächenfestigkeit an den gegenüberliegenden breiteren Seiten der Pins abgebildet werden. Bereits eine Differenz der kritischen Energiefreisetzungsrate  $G_{IC}$  der Kohäsivelemente von 10 % zwischen den entsprechenden Grenzflächen der rechteckigen z-Pins führte dabei zu dem in Abbildung 4.14 dargestellten Ablöseverhalten quer ausgerichteter rechteckiger z-Pins in unidirektionalen bzw. rechteckiger Pins



in quasi-isotropen Laminaten. Das vorzeitige Ablösen einer Seite des Pins entlastet dabei die gegenüberliegende Fläche derart, dass diese auch nach vollständiger Abkühlung von der Aushärtetemperatur mit dem umliegenden Laminat verbunden bleibt.

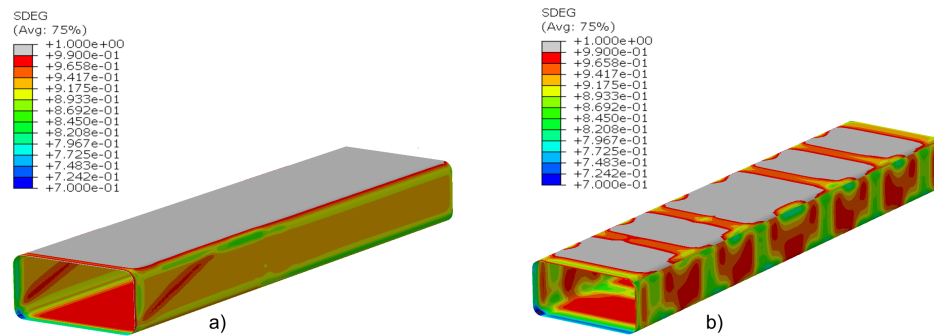


Abbildung 4.14: Numerisch ermittelter Grenzflächenzustand an (a) quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins in unidirektionalen und (b) rechteckigen z-Pins in quasi-isotropen Laminaten. Vollständig versagte Grenzflächenelemente sind in grau dargestellt.

Die anhand der Mikrostrukturuntersuchungen festgestellten Unterschiede im Ablöseverhalten kreisrunder und rechteckiger z-Pins konnten damit durch die numerische Simulation nachvollzogen werden. Aufgrund der ganzheitlichen Betrachtung des Grenzflächenzustands zwischen Pin und Laminat kann anhand der durchgeführten Untersuchungen, im Gegensatz zur alleinigen Betrachtung von mikroskopischen Schliffen, zusätzlich eine Aussage über den Anteil der geschädigten Grenzfläche an der gesamten Pinoberfläche getroffen werden. Aufgrund einer geringen Unsicherheit bezüglich der Kennwerte der verwendeten Werkstoffe wird dabei jedoch auf eine exakte quantitative Aussage verzichtet. Für kreisrunde z-Pins in unidirektionalen Laminaten beträgt der in den Simulationen festgestellte Anteil der Grenzfläche, die sich während des Abkühlprozesses vom Grundlaminat löst, etwa 60 – 70 % der gesamten Pinoberfläche. Demgegenüber steht eine Ablösung der rechteckigen z-Pins, unabhängig von ihrer Ausrichtung im Laminat, von ungefähr einem Drittel der gesamten Pinoberfläche. Besonders stark fallen die Unterschiede im Grenzflächenzustand zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins in quasi-isotropen Laminaten aus. Während für kreisrunde Pins anhand der numerischen Untersuchungen eine nahezu vollständige Ablösung vom Grundlaminat ermittelt werden konnte, zeigen rechteckige Pins in quasi-isotropen FKV ein Ablöseverhalten, das dem rechteckiger z-Pins in unidirektionalen Laminaten stark ähnelt. Der Anteil der geschädigten Pinoberfläche beträgt daher für rechteckige z-Pins auch in QI-Laminaten lediglich etwa ein Drittel der gesamten Grenzfläche zum Laminat.

## 4.3 Experimentelle Untersuchungen

### 4.3.1 Pullout-Eigenschaften

In Abbildung 4.15 ist je eine repräsentative Pulloutkurve für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern dargestellt. Unabhängig vom Laminataufbau und der z-Pin-Geometrie weisen alle Brückenkraftkurven den für den Pinauszug typischen tri-linearen Verlauf auf, welcher die elastische Pindeformation, einen mehr oder weniger stark ausgeprägten plötzlichen Abfall der Kraft sowie den anschließenden reibungsbehafteten Pinauszug aus dem Laminat beinhaltet. Während die erzielte Pinablösekraft dabei in unidirektionalen Prüfkörpern unabhängig von der Pingeometrie deutlich oberhalb der maximalen Reibkraft liegt, trifft dies in quasi-isotropen Laminaten nur auf die Verwendung von rechteckigen z-Pins zu.

Abbildung 4.16 zeigt die im Pulloutversuch erzielten durchschnittlichen Ablöse- und Reibkräfte pro Pin für kreisrunde und rechteckige z-Pins in beiden untersuchten Laminaten. Zusätzlich ist für rechteckige Pins die Steigerung gegenüber kreisrunden z-Pins dargestellt. Durch die Verwendung von rechteckigen z-Pins konnten für beide untersuchten Laminataufbauten sowohl die Ablöse- als auch die maximalen Reibkräfte gesteigert werden, wobei die Steigerung der Kraft zum Zeitpunkt der Pinablösung in beiden Laminaten deutlich größer ausfällt als die Steigerung der maximalen Reibkraft. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die getesteten z-Pins, unabhängig von der Pingeometrie, in unidirektionalen FKV deutlich größere Brückenkräfte übertragen können als in quasi-isotropen Laminaten.

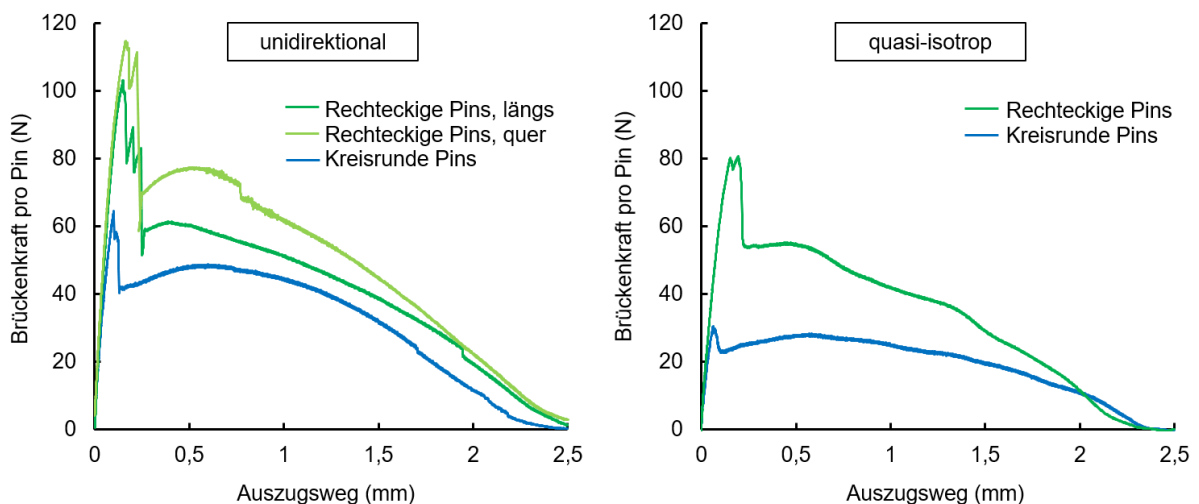


Abbildung 4.15: Charakteristische Brückenkraftkurven kreisrunder und rechteckiger z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten

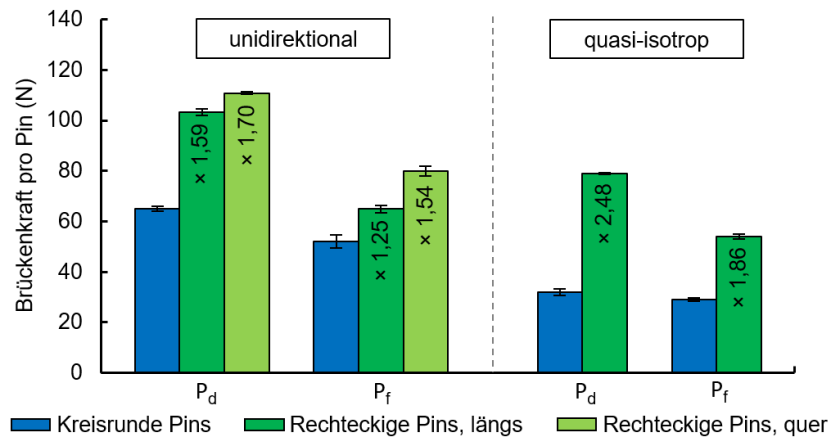


Abbildung 4.16: Durchschnittliche Brückenkräfte pro Pin für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten

Die Übertragung der Brückenkräfte zwischen Pin und Laminat findet ausschließlich über die Oberfläche der eingesetzten z-Pins statt. Mit den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Pingeometrien wird diese durch den Einsatz rechteckiger z-Pins gegenüber kreisrunden Pins um 27,5 % vergrößert. Die unter Verwendung von rechteckigen Pins erreichte prozentuale Steigerung der ermittelten Brückenkräfte fällt daher, mit Ausnahme der maximalen Reibkraft längs ausgerichteter rechteckiger Pins in UD-Laminaten, zum Teil deutlich größer aus als durch die reine Oberflächenvergrößerung zu erwarten wäre. Vor allem in quasi-isotropen Laminaten konnte dabei eine enorme Steigerung der Brückenkräfte gegenüber kreisrunden z-Pins festgestellt werden. Zudem übertrifft die Zunahme der Brückenkräfte die in vergleichbaren Untersuchungen zum Einsatz rechteckiger z-Pins in kaltaushärtenden unidirektionalen FKV erzielte Verbesserung deutlich. Knaupp et al. [14, 16] konnten in diesen Werkstoffen lediglich eine Steigerung der Ablösekraft um etwa 13 % gegenüber kreisrunden z-Pins feststellen. Es ist daher wahrscheinlich, dass die mikrostrukturellen Veränderungen, die in Zusammenhang mit der Heißaushärtung der verwendeten Prepregmaterialien stehen, zu einer weiteren Steigerung der in der Grenzfläche zwischen Pin und Laminat übertragbaren Schubspannungen während des Pulloutversuchs geführt haben.

In Abbildung 4.17 sind dazu die Schubspannungen in der Pin-Laminat-Grenzfläche im Ablösezeitpunkt sowie während des reibungsbehafteten Pinauszugs dargestellt. Der Vergleich der Grenzflächenspannungen an den charakteristischen Punkten der Pulloutkurve zeigt, dass die Verwendung von rechteckigen z-Pins in beiden Laminataufbauten und unabhängig von ihrer Ausrichtung im Laminat zu einer gesteigerten Grenzflächenfestigkeit  $\tau_d$  führt. Diese konnte im Vergleich zu kreisrunden Pins in UD-Laminaten je nach Ausrichtung der z-Pins um 22 % (längs) bzw. 29 % (quer) gesteigert werden. Analog der Steigerung der Brückenkräfte, fällt auch die Steigerung der Grenzflächenspannungen in quasi-isotropen

Laminaten deutlich stärker aus. Im Zusammenhang mit der Grenzflächenfestigkeit konnte dabei mit einer Verdopplung von  $\tau_d$  eine deutliche Steigerung gegenüber kreisrunden Pins festgestellt werden.

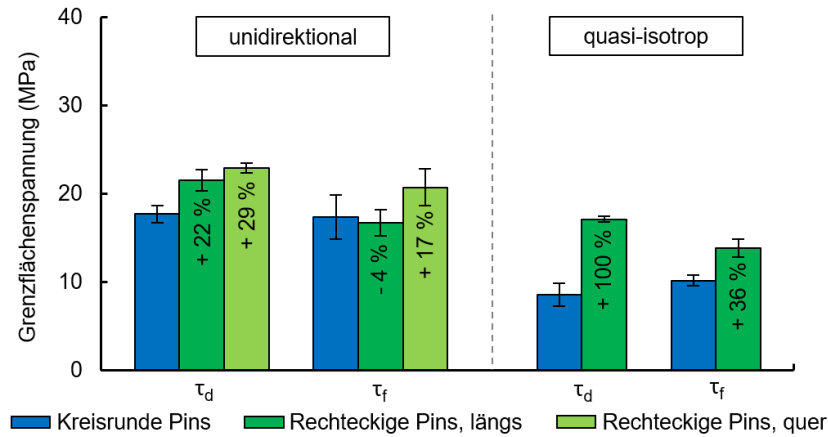


Abbildung 4.17: Schubspannungen in der Pin-Laminat-Grenzfläche zum Zeitpunkt der Pinablösung ( $\tau_d$ ) sowie bei Erreichen der maximalen Reibkraft ( $\tau_f$ ) für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern

Die Erhöhung der Grenzflächenfestigkeit zwischen Pin und Laminat ist dabei auf die in den Abschnitten 4.1.3 und 4.2 beschriebenen Unterschiede im Zustand der Grenzfläche zwischen Pin und Laminat im Anschluss an die Autoklavaushärtung zurückzuführen. Die durchgeführten FE-Untersuchungen haben gezeigt, dass unter Verwendung von rechteckigen z-Pins in beiden Laminaten ein deutlich größerer Anteil der Pin-Laminat-Grenzfläche nach erfolgter Abkühlung des Werkstoffs intakt bleibt. Entsprechend der numerischen Ergebnisse konnte daher im Rahmen der experimentellen Untersuchungen die für rechteckige z-Pins beschriebene Steigerung von  $\tau_d$  festgestellt werden. Durch die gezeigte nahezu vollständige Schädigung der Grenzfläche zwischen kreisrunden z-Pins und QI-Laminaten und das damit verbundene Fehlen einer nennenswerten Anhaftung an den Grundwerkstoff fällt die Steigerung der Grenzflächenfestigkeit in quasi-isotropen Prüfkörpern folgerichtig deutlich stärker aus.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei der Betrachtung des Einflusses der Pingeometrie auf die in der Grenzfläche herrschende Schubspannung bei Erreichen der maximalen Reibkraft. In unidirektionalen Laminaten konnte hier ein spürbarer Einfluss der Ausrichtung rechteckiger z-Pins auf die Ergebnisse festgestellt werden. Während quer ausgerichtete Pins zu einer Steigerung von  $\tau_f$  um 17 % führten, wurde für längs ausgerichtete rechteckige Pins sogar eine geringfügige Abnahme der Schubspannung um 4 % ermittelt. Die für rechteckige z-Pins ermittelte Steigerung von  $\tau_f$  in QI-Laminaten beträgt 36 %.

Einen großen Einfluss auf die während des reibungsbehafteten Pinauszugs erzielten Schubspannungen in der Pin-Laminat-Grenzfläche übt die Schrägstellung der Pins im Laminat aus. Aufgrund der Winkelabweichung zwischen den eingebrachten z-Pins und ihrer Auszugsrichtung kommt es während des Pulloutvorgangs zu einer S-förmigen Verformung der Pins. Der dabei entstehende, sogenannte Snubbing-Effekt [102] führt zu einem erhöhten Anpressdruck zwischen Pin und Laminat im Bereich der Rissebene. Wie in Abbildung 4.18 dargestellt, kommt es aufgrund der Anpressung in diesen Bereichen zu einer erhöhten Reibung zwischen Pin und Laminat [11], welche sich auf die über die gesamte Pinlänge gemittelte Schubspannung  $\tau_f$  auswirkt. Zwar konnten anhand der Mikrostrukturuntersuchungen Abweichungen im Inklinationswinkel zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins festgestellt werden, auf welche die unterschiedlichen hohen Schubspannungen während des reibungsbehafteten Pinauszugs zurückzuführen sein könnten. Vor dem Hintergrund der deutlichen Steigerung von  $\tau_f$  durch den Einsatz rechteckiger z-Pins erscheinen die Abweichungen in den Inklinationswinkeln beider Pingeometrien jedoch zu gering, als dass die gesteigerten Schubspannungen alleine auf die Unterschiede in der Schrägstellung der Pins zurückzuführen wären. Darüber hinaus stünden sich in quasi-isotropen Laminaten die Ergebnisse der Messung der Inklinationswinkel und der Schubspannungen während des reibungsbehafteten Pinauszugs widersprüchlich gegenüber. Auch wenn dies im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit nachgewiesen werden konnte, scheint die festgestellte Abhängigkeit von  $\tau_f$  von der Pingeometrie und in UD-Laminaten von der Ausrichtung der rechteckigen Pins stattdessen vielmehr mit den Unterschieden in der Größe der Kontaktfläche, in der die beschriebene erhöhte Reibung vorherrscht, in Zusammenhang zu stehen.

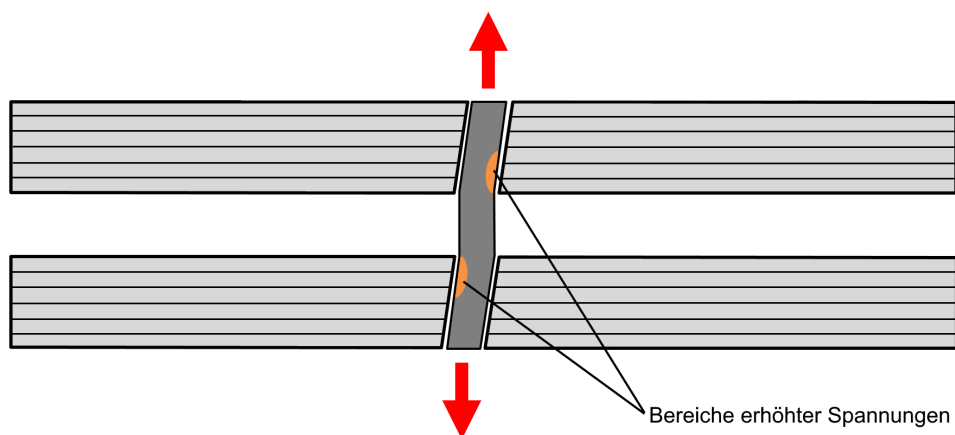


Abbildung 4.18: Schematische Darstellung des Snubbing-Effekts

Aufgrund der gegenüber kreisrunden z-Pins erhöhten Brückenkräfte erhöht sich ebenfalls die während des Pinauszugs dissipierte Energie unter Verwendung von rechteckigen z-Pins. In Abbildung 4.19 ist die während der elastischen Pindeformation bzw. des reibungsbehafteten Pinauszugs verrichtete Arbeit für beide Pin geometrien dargestellt. Zwar fällt die relative Steigerung der elastischen Arbeit deutlich größer aus, aufgrund des großen Anteils der Reibarbeit an der gesamten während des Pulloutversuchs dissipierten Energie trägt letztere jedoch den überwiegenden Anteil des Zugewinns an verrichteter Auszugsarbeit bei. Insgesamt konnte die dissipierte Energie in UD-Laminaten durch die Verwendung rechteckiger z-Pins um 36 % (längs) bzw. 61 % (quer) gesteigert werden. Aufgrund der in QI-Laminaten festgestellten deutlicheren Steigerung der beim reibungsbehafteten Pinauszug wirkenden Schubspannung in der Grenzfläche fällt die Steigerung in diesen Laminaten mit 71 % entsprechend höher aus.

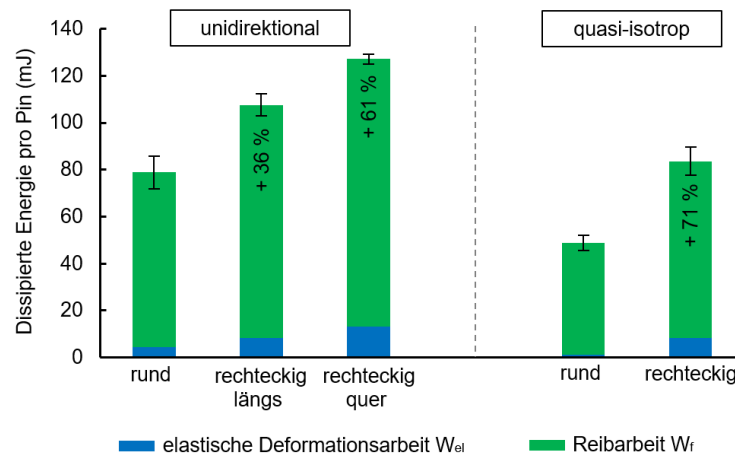


Abbildung 4.19: Darstellung der während des Pulloutversuchs dissipierten Energie pro Pin für kreisrunde und rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern

Wie in Abschnitt 2.5.1 beschrieben, wurden in der Vergangenheit bereits zahlreiche Versuche unternommen die Brückenkräfte während des Pinauszugs durch geeignete Maßnahmen zu steigern. Die jeweils experimentell in UD-Laminaten ermittelte Steigerung der Grenzflächenfestigkeit sowie, falls angegeben, die Steigerung der maximalen Schubspannung während des reibungsbehafteten Pinauszugs und der während des Pinauszugs dissipierten Gesamtenergie sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Aufgrund der zum Teil stark differierenden Wirkmechanismen sowie des großen Einflusses der jeweils verwendeten Pin- und FKV-Werkstoffe fällt ein detaillierter Vergleich der genannten Verfahren mit den Ergebnissen dieser Arbeit schwer. Anhand der in der Tabelle angegebenen prozentualen Steigerung der genannten Kennwerte gegenüber den jeweiligen Referenzpins zeigt sich jedoch, dass die Verwendung neuer Pin geometrien eine geeignete Alternative zu den genannten, teilweise aufwendig zu realisierenden Verfahren darstellen kann.

Tabelle 4.1: Übersicht über die gegenüber den jeweiligen Referenzpins verbesserten Grenzflächeneigenschaften externer Untersuchungen (OF = Oberfläche)

Mechanismus	Art der Änderung	$\Delta\tau_d$	$\Delta\tau_f$	$\Delta W_{ges}$	Urheber
OF-Behandlung	Tieftemperatur	+ 20 %	+ 25 %	k.A.	[47, 48, 50]
OF-Behandlung	Sauerstoffplasma	+ 42 %	+ 40 %	k.A.	[47, 48, 50]
OF-Behandlung	C-Partikel	+ 43 %	k.A.	+ 160 %	[51]
OF-Behandlung	CNTs	+ 29 %	k.A.	+ 80 %	[51]
Formschluss	Pinverdrehung	+ 61 %	k.A.	k.A.	[52]
Formschluss	gekerbte Pins	+ 83 %	+ 71 %	+ 13 %	[53]

### 4.3.2 Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-I-Beanspruchung

In Abbildung 4.20 sind repräsentative Kraft-Weg-Verläufe für unidirektionale und quasi-isotrope Prüfkörper, die einer quasi-statischen Mode-I-Beanspruchung ausgesetzt wurden, dargestellt. Die Prüfkörper aller Testreihen zeigen einen anfänglichen linearen Anstieg der Rückstellkraft mit zunehmendem Rissöffnungsweg. Das Einsetzen des Risswachstums von der Anrisslänge wird im Kraft-Weg-Verlauf durch einen geringen Abfall der Kraft angezeigt. Die Höhe der Kraft, bei der dieser Kraftabfall zu verzeichnen ist, liegt dabei für unverpinnte und z-Pin-verstärkte Lamine auf etwa dem selben Niveau. Ein Einfluss einer z-Pin-Verstärkung auf das Einsetzen des Risswachstums konnte daher im Rahmen dieser Arbeit nicht festgestellt werden.

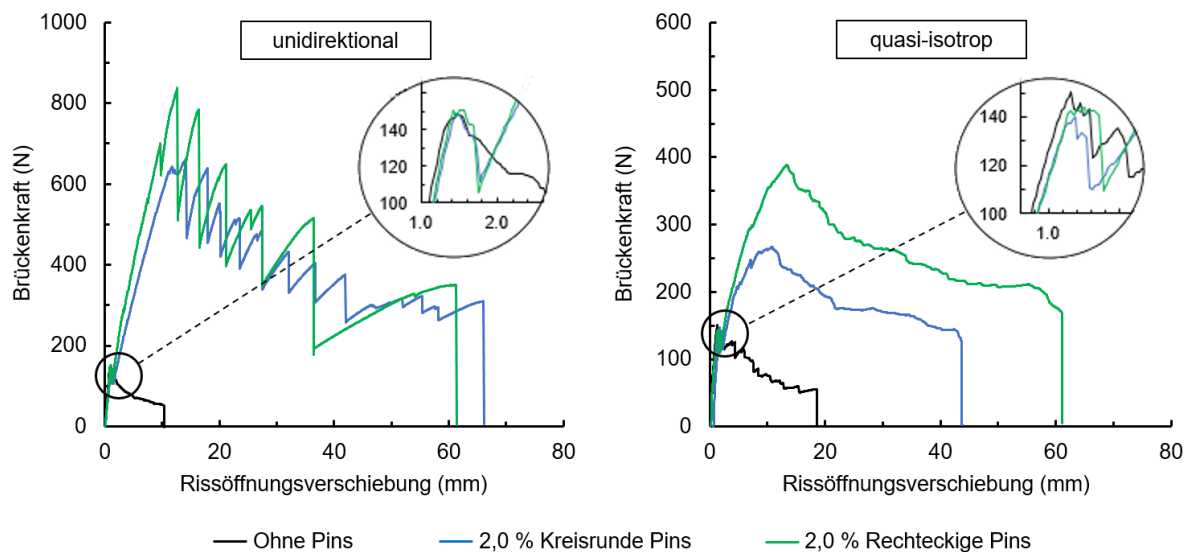


Abbildung 4.20: Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-I-Beanspruchung



Im Anschluss an den Kraftabfall zeigten die getesteten Prüfkörper mit und ohne z-Pin-Verstärkung ein stark unterschiedliches Verhalten. Für beide Laminattypen ist in Verbindung mit unverpinnten Prüfkörpern nach dem Einsetzen des Rissfortschritts eine stetige Abnahme der Rückstellkraft zu verzeichnen. Die Entwicklung einer z-Pin-Brückenzone (Abbildung 4.21.a) in den verpinnten Laminaten führt hingegen zu einem weiteren Kraftanstieg bis zu einer Maximalkraft, deren Höhe vom Pingegehalt, der Pingeometrie sowie dem Laminataufbau abhängig ist. Dieser weitere Kraftanstieg ist häufig von zwischenzeitlichen, kleineren Kraftabfällen begleitet, welche jeweils das Ablösen einer Pinreihe vom Grundlaminat anzeigen. Bei Erreichen der Maximalkraft hat sich die z-Pin-Brückenzone vollständig im Laminat ausgebildet (Abbildung 4.21.b) und die Anzahl der Pinreihen, die sich innerhalb der Brückenzone im Eingriff befinden, bleibt konstant. In der anschließenden dritten Phase der erzielten Kraft-Weg-Verläufe z-Pin-verstärkter FKV wächst der Riss durch die Probe und die gemessene Kraft nimmt, aufgrund der zunehmenden Länge der Hebelarme der DCB-Prüfkörper, kontinuierlich ab. In quasi-isotropen FKV konnte in dieser Phase ein stabiles Risswachstum durch die Prüfkörper beobachtet werden. Im Gegensatz dazu weisen unidirektionale Laminare mit z-Pin-Verstärkung ein ausgeprägtes stick-slip-Verhalten auf. Der Rissfortschritt ist dabei durch ein abwechselndes instabiles Risswachstum und Verharren der Rissspitze gekennzeichnet. In der dritten Phase der Kraft-Weg-Verläufe ist dieses Verhalten der UD-Prüfkörper durch eine sich wiederholende Sequenz von Kraftabfällen und dem anschließenden Anstieg der gemessenen Kraft zu erkennen.

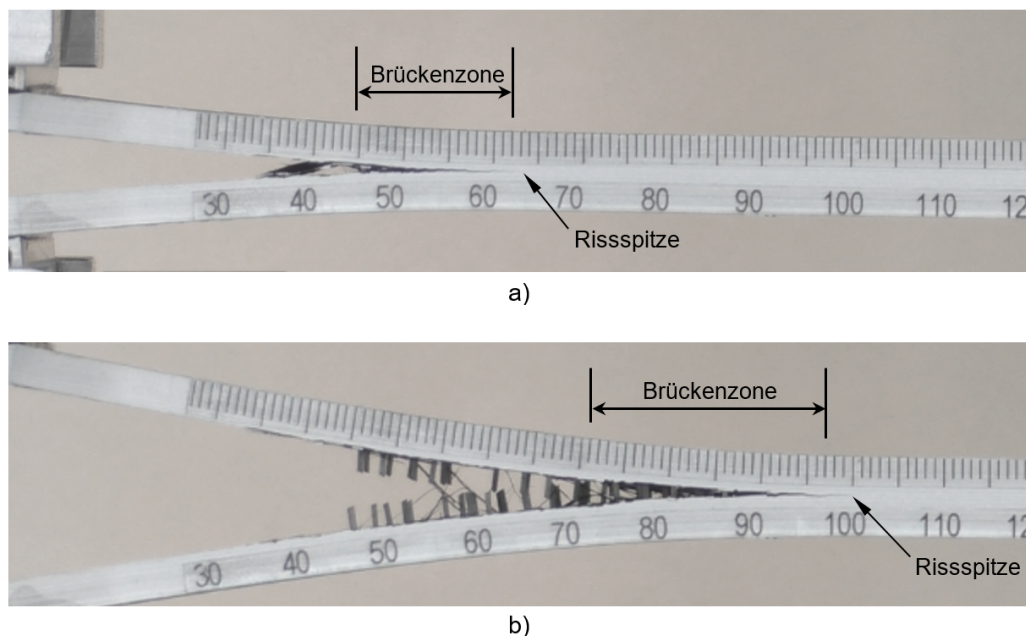


Abbildung 4.21: Brückenzone innerhalb eines z-Pin-verstärkten DCB-Prüfkörpers in der (a) sich entwickelnden und (b) vollständig ausgebildeten Phase



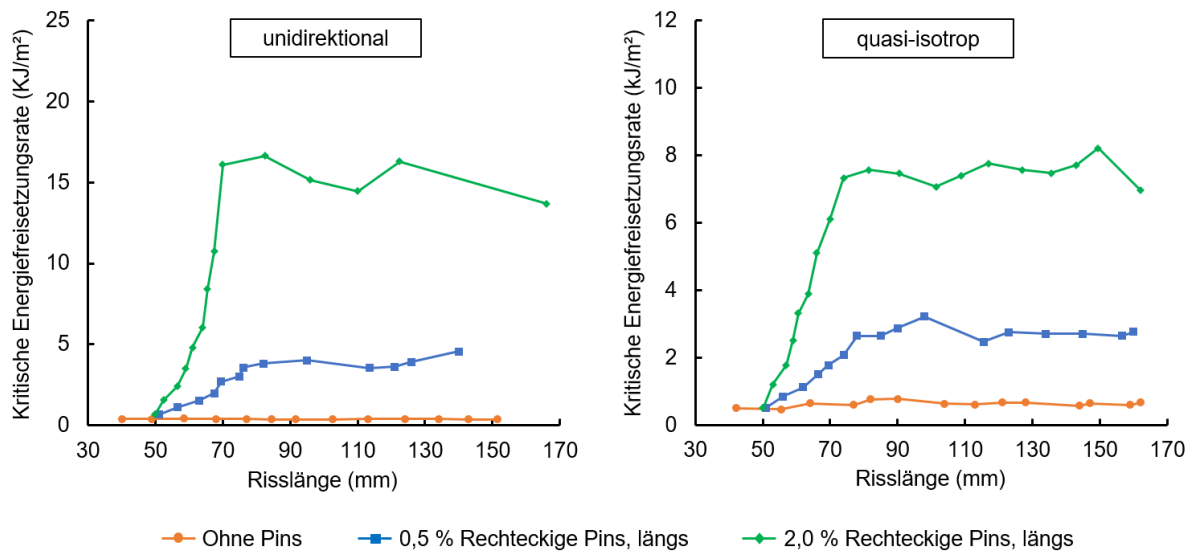


Abbildung 4.22: Charakteristische Risswiderstandskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-I-Beanspruchung

Die durch die z-Pin-Verstärkung hervorgerufenen erhöhten Brückenkräfte wirken sich stark auf die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Risswiderstandskurven aus. Diese sind in Abbildung 4.22 als Funktion der kritischen Energiefreisetzungsrate von der Risslänge für repräsentative unidirektionale und quasi-isotrope Lamine dargestellt. Aufgrund des beschriebenen stick-slip-Verhaltens z-Pin-verstärkter UD-Prüfkörper war es nicht für jede Probe möglich alle 10 mm einen Wert für  $G_{IC}$  zu bestimmen. Dennoch lässt die Auswertung der ermittelten Risswiderstandskurven eindeutige Rückschlüsse auf das Verhalten der getesteten DCB-Prüfkörper zu. Die Auswertung der Kraft-Weg-Verläufe hat gezeigt, dass die verwendete z-Pin-Verstärkung keinen Einfluss auf die Höhe der Kraft bei Einsetzen des Risswachstums ausübt. Entsprechend beginnen alle Risswiderstandskurven auf dem gleichen  $G_{IC}$ -Niveau. Unverpinnte Lamine weisen dabei eine nahezu konstante kritische Energiefreisetzungsrate über den gesamten Risslängenbereich auf. Im Gegensatz dazu steigt die kritische Energiefreisetzungsrate verpinnter Lamine, sobald der Riss den Bereich der z-Pin-Verstärkung erreicht hat, mit zunehmender Risslänge stetig an. Hat sich die z-Pin-Brückenzone vollständig im Laminat ausgebildet, bleibt  $G_{IC}$  in dieser dritten Phase des DCB-Versuchs bis zum Versagen der Probe nahezu konstant.

Das Versagen der z-Pin-Verstärkung ist durch das vollständige Herausziehen der Pins aus dem Laminat gekennzeichnet, weshalb alle für den Pin-Pullout beschriebenen Verstärkungsmechanismen zur Übertragung von Brückenkräften beitragen können. Dementsprechend ist, analog der Ergebnisse der Pullout-Untersuchungen, die Höhe der kritischen Energiefreisetzungsrate ebenfalls stark von der verwendeten z-Pin-Geometrie abhängig.

Für z-Pin-verstärkte Lamine erfolgte die Bestimmung von  $G_{IC}$  dabei zum Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Brückenkraft, also direkt im Anschluss an die vollständige Ausbildung der Brückenzone. In Abbildung 4.23 ist der Einfluss der Pingeometrie auf die ermittelten  $G_{IC}$ -Werte für unidirektionale und quasi-isotrope Lamine graphisch dargestellt. Die berechnete kritische Energiefreisetzungsrate unverpinnter Lamine beträgt je nach Laminataufbau  $0,4 \text{ kJ/m}^2$  (UD) bzw.  $0,5 \text{ kJ/m}^2$  (QI). In beiden Laminen führt die Einbringung von z-Pins zu einer signifikanten Steigerung der ermittelten  $G_{IC}$ -Werte. Dabei erreichen rechteckige z-Pins die höchsten kritischen Energiefreisetzungsrate, wobei längs ausgerichtete Pins den quer ausgerichteten z-Pins nominell leicht überlegen sind. Unter Berücksichtigung der vergleichsweise hohen Messunsicherheiten kann jedoch kein definitiver Einfluss der Ausrichtung rechteckiger z-Pins auf die Ergebnisse festgestellt werden. Gegenüber unverpinnten Laminen konnte die kritische Energiefreisetzungsrate durch die Verwendung rechteckiger z-Pins mit einem Pingegehalt von 2,0 % etwa um das 42-fache in unidirektionalen bzw. um das 13-fache in quasi-isotropen Laminen gesteigert werden. Die höhere Effektivität der z-Pins in unidirektionalen Laminen hängt dabei mit den, gegenüber quasi-isotropen Laminen, höheren Brückenkräften während des Pinauszugs zusammen. Die deutliche Steigerung der bruchmechanischen Eigenschaften gegenüber unverpinnten FKV deckt sich in ihrer Größenordnung mit den Ergebnissen vergleichbarer experimenteller Untersuchungen [2, 103] und ist daher als plausibel einzustufen.

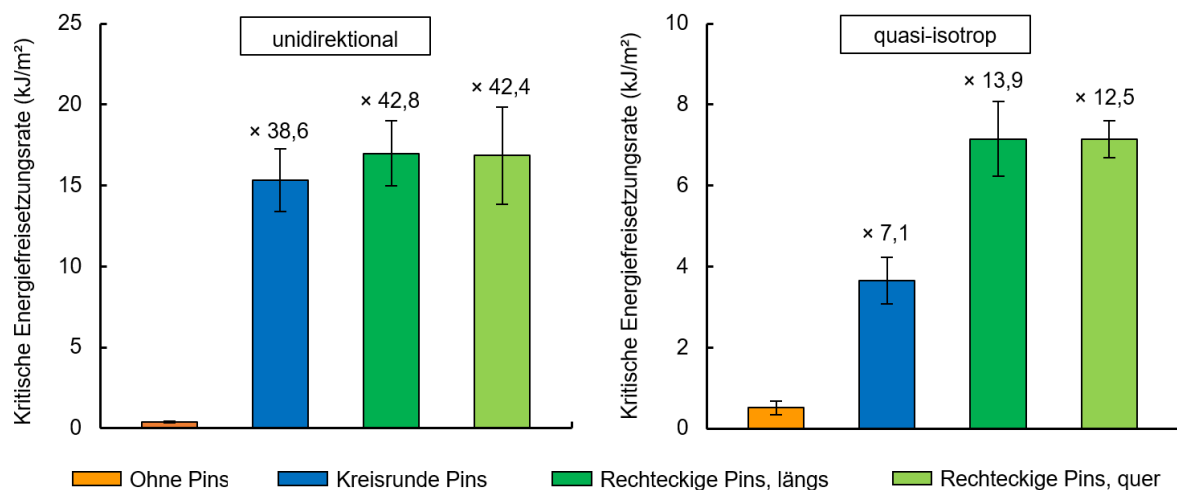


Abbildung 4.23: Abhängigkeit der kritischen Energiefreisetzungsrate von der Pingeometrie für unidirektionale und quasi-isotrope Lamine unter Mode-I-Beanspruchung

Sowohl in unidirektionalen als auch in quasi-isotropen Laminaten zeigen sich rechteckige z-Pins, unabhängig von ihrer Ausrichtung im Laminat, in Hinblick auf die erzielte kritische Energiefreisetzungsrate überlegen. Dabei zeigt sich, analog zu den dargestellten Ergebnissen der Pullout-Untersuchungen, eine starke Abhängigkeit der gegenüber kreisrunden Pins erzielten Steigerung vom Laminataufbau. Während die kritische Energiefreisetzungsrate durch den Einsatz längs ausgerichteter rechteckiger Pins in unidirektionalen FKV um 11 % gegenüber kreisrunden Pins erhöht werden konnte, beträgt die Steigerung in quasi-isotropen Laminaten 96 %.

Der Einfluss des Pingehalts auf die kritische Energiefreisetzungsrate unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine, welche mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins verstärkt wurden, ist in Abbildung 4.24 dargestellt. Beide Lamine zeigen dabei eine lineare Abhängigkeit der kritischen Energiefreisetzungsrate vom verwendeten Pingehalt. Für unidirektionale Prüfkörper konnte dabei ein Anstieg von  $G_{IC}$  um  $8,4 \text{ kJ/m}^2$  für jede Erhöhung des Pingehalts um 1 % festgestellt werden. Aufgrund der etwas geringeren Brückenkräfte steht dem eine Steigerung der kritischen Energiefreisetzungsrate von  $3,2 \text{ kJ/m}^2$  für jede Erhöhung des Pingehalts um 1 % in quasi-isotropen Laminaten gegenüber.

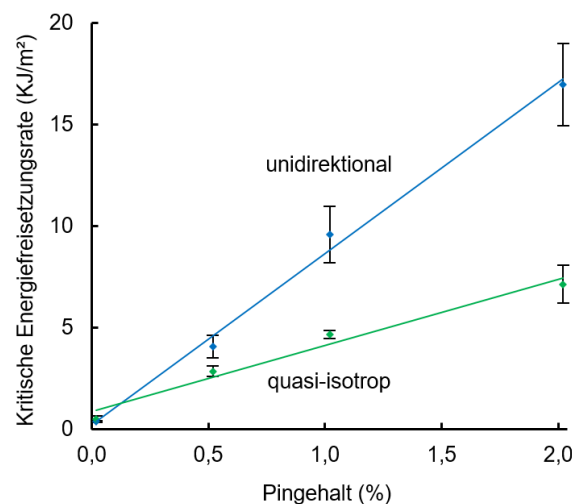


Abbildung 4.24: Abhängigkeit der kritischen Energiefreisetzungsrate vom Pingehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten unter Mode-I-Beanspruchung

In Abbildung 4.25 sind die in den experimentellen Untersuchungen unter schwingender Mode-I-Beanspruchung ermittelten Rissfortschrittskurven für unverpinnte Lamine und Prüfkörper mit längs ausgerichteten rechteckigen Pins mit verschiedenen Pingehalten dargestellt. Für alle Testreihen sind dabei deutliche Schwankungen in der Rissfortschrittsge­schwindigkeit bei vergleichbarer Beanspruchungsamplitude erkennbar. Diese konnten bereits in früheren Untersuchungen beobachtet werden und sind hauptsächlich auf die dis-

### 4.3 Experimentelle Untersuchungen

krete Verteilung der z-Pin-Verstärkung und ein daraus resultierendes stick-slip-Verhalten der verpinnten Prüfkörper zurückzuführen [2, 71]. Die Ergebnisse zeigen dennoch eindeutig, dass die Rissfortschrittsgeschwindigkeit in beiden Laminaten durch die Verwendung rechteckiger z-Pins deutlich abnimmt, wobei sich die Rissfortschrittskurven der getesteten Prüfkörper mit zunehmendem Pingegehalt nahezu parallel hin zu höheren Beanspruchungsamplituden verschieben.

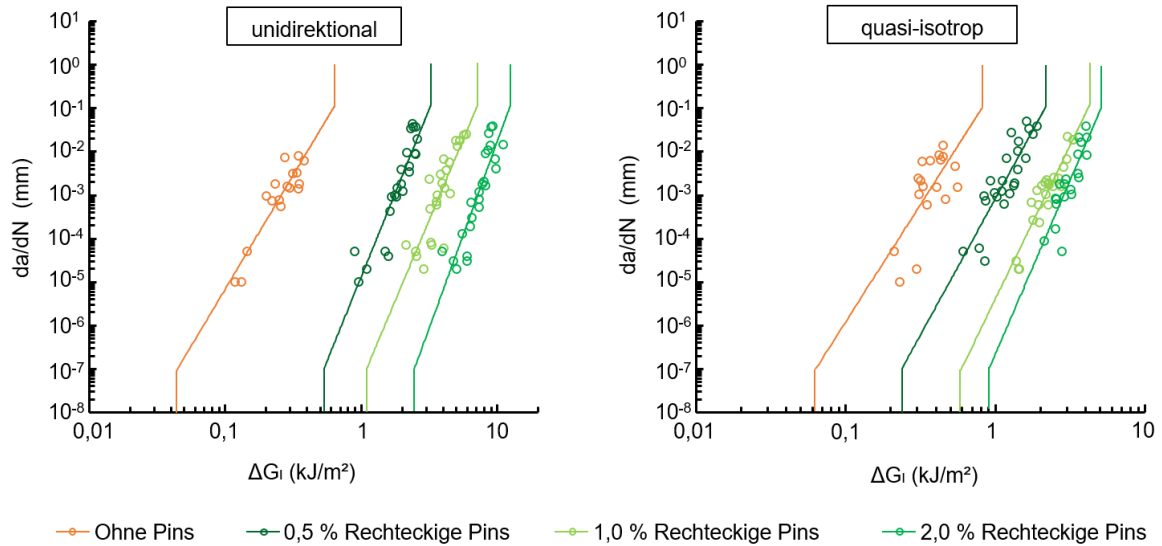


Abbildung 4.25: Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Laminat unter Mode-I-Beanspruchung in Abhängigkeit vom Pingegehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins

Diese Verschiebung der Rissfortschrittskurven führt zu einer signifikanten Erhöhung der ermittelten Grenzwerte für einsetzendes Risswachstum  $\Delta G_{I,th}$  sowie instabiles Risswachstum  $\Delta G_{I,c}$  gegenüber unverpinnten Laminaten. Da für die in den experimentellen Untersuchungen verwendeten Lastniveaus weder instabiles Risswachstum noch ein Stillstand des Risses beobachtet werden konnte, mussten im Rahmen dieser Arbeit beide Werte künstlich festgelegt werden. Es ist daher ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass sich die Auswertung des Einflusses rechteckiger und kreisrunder z-Pins auf die genannten Größen ausschließlich auf errechnete und nicht gemessene Werte bezieht. Die Wahl der Rissfortschrittsgeschwindigkeiten, bei denen einsetzendes bzw. instabiles Risswachstum bestimmt wurden, orientierte sich dabei an den ermittelten Grenzwerten von Pingkarawat und Mouritz [2] aus vergleichbaren Untersuchungen an kreisrunden z-Pins. Die Bestimmung der Grenzwerte erfolgte daher bei Risswachstumsgeschwindigkeiten von 0,1 mm ( $\Delta G_{I,c}$ ) bzw.  $10^{-7}$  mm ( $\Delta G_{I,th}$ ).

Die ermittelten Grenzwerte für einsetzendes Risswachstum und instabiles Risswachstum sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Sowohl in unidirektionalen als auch quasi-isotropen Laminaten erhöhen sich beide Grenzwerte mit zunehmendem Pingehalt. Gegenüber unverpinnten Laminaten konnte dabei für einen Pinanteil von 2,0 % eine signifikante Steigerung des Grenzwertes für einsetzendes Risswachstum um etwa das 54-fache in unidirektionalen bzw. das 15-fache in quasi-isotropen FKV ermittelt werden. Demgegenüber fällt die Steigerung des Grenzwertes für instabiles Risswachstum etwas moderater aus. Während  $\Delta G_{I,c}$  in unidirektionalen Laminaten etwa um das 20-fache gesteigert werden konnte, betrug die Erhöhung in quasi-isotropen Laminaten etwa das sechsfache. Analog zu den Ergebnissen der quasi-statischen Untersuchungen ist die Einbringung von z-Pins damit auch im Falle einer schwingenden Beanspruchung in unidirektionalen Laminaten deutlich effektiver.

Tabelle 4.2: Versuchsergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen unter schwingender Mode-I-Rissöffnungsbeanspruchung

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt	$\Delta G_{I,th}$	$\Delta G_{I,c}$	M
UD	-	-	0,0 %	0,04 kJ/m <sup>2</sup>	0,62 kJ/m <sup>2</sup>	5,2
UD	eckig	längs	0,5 %	0,55 kJ/m <sup>2</sup>	3,30 kJ/m <sup>2</sup>	7,7
UD	eckig	längs	1,0 %	1,10 kJ/m <sup>2</sup>	7,04 kJ/m <sup>2</sup>	7,4
UD	eckig	längs	2,0 %	2,42 kJ/m <sup>2</sup>	12,10 kJ/m <sup>2</sup>	8,6
UD	eckig	quer	2,0 %	2,31 kJ/m <sup>2</sup>	14,77 kJ/m <sup>2</sup>	7,4
UD	rund	-	2,0 %	2,52 kJ/m <sup>2</sup>	16,02 kJ/m <sup>2</sup>	7,5
QI	-	-	0,0 %	0,06 kJ/m <sup>2</sup>	0,81 kJ/m <sup>2</sup>	5,4
QI	eckig	längs	0,5 %	0,23 kJ/m <sup>2</sup>	2,12 kJ/m <sup>2</sup>	6,3
QI	eckig	längs	1,0 %	0,59 kJ/m <sup>2</sup>	4,17 kJ/m <sup>2</sup>	7,1
QI	eckig	längs	2,0 %	0,92 kJ/m <sup>2</sup>	5,14 kJ/m <sup>2</sup>	8,0
QI	eckig	quer	2,0 %	0,84 kJ/m <sup>2</sup>	4,91 kJ/m <sup>2</sup>	7,8
QI	rund	-	2,0 %	0,50 kJ/m <sup>2</sup>	4,20 kJ/m <sup>2</sup>	6,5

Der Einfluss der Pingeometrie auf die Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Laminat ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Während die Ergebnisse der quasi-statischen Untersuchungen für beide Laminataufbauten einen signifikanten Einfluss der Pingeometrie auf die bruchmechanischen Eigenschaften unter Mode-I-Beanspruchung offenbarten, konnte dies für schwingende Beanspruchungen nicht nachgewiesen werden. Abhängig von ihrer Ausrichtung im Laminat erzielen rechteckige z-Pins in quasi-isotropen FKV eine Steigerung von  $\Delta G_{I,th}$  um 84 % (längs) und 68 % (quer) gegenüber kreisrunden z-Pins. Wenn auch etwas weniger stark, konnte zusätzlich der Grenzwert für instabiles Risswachstums in diesen Laminaten durch die Verwendung rechteckiger z-Pins um 22 % für längs ausgerichtete bzw. um 17 % für quer ausgerichtete rechteckige Pins gesteigert werden. Im Gegensatz dazu schlägt sich die in den quasi-statischen Versuchen ermittelte erhöhte kritische Energiefreisetzungsrate rechteckiger z-Pins in unidirektionalen FKV nicht in den erzielten Rissfortschrittskurven nieder.

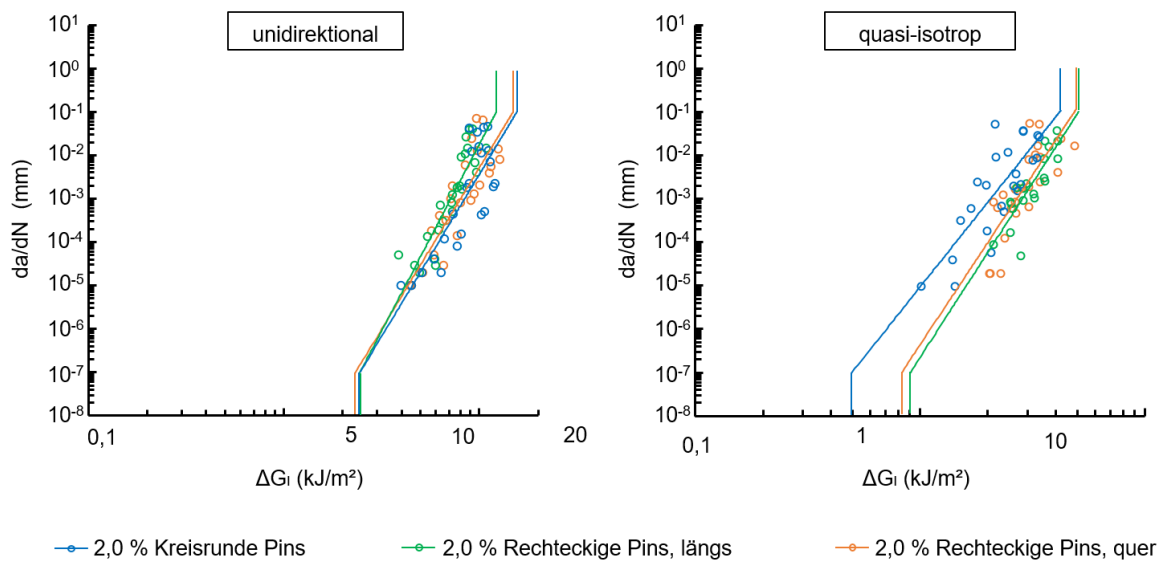


Abbildung 4.26: Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Mode-I-Beanspruchung in Abhängigkeit von der Pingeometrie

Die Ergebnisse der Untersuchungen unter schwingender Beanspruchung zeigen damit, dass die Unterschiede zwischen den Pingeometrien deutlich weniger stark ausgeprägt sind als dies für die quasi-statischen Untersuchungen ermittelt werden konnte. Eine naheliegende Erklärung für diese Beobachtung sind auftretende Abriebeffekte während der schwingenden Beanspruchung und der dabei stattfindenden wiederholten Gleitbewegung der Pins in den entstehenden Löchern im Laminat. Eine solche Beobachtung wurde von Pingkarawat und Mouritz [2] beschrieben, die von einem Abriebprozess in den Löchern während einer schwingenden Belastung und einer damit einhergehenden Weitung der Löcher berichten. Abbildung 4.27 zeigt dazu im Rahmen dieser Arbeit entstandene Mikroskopaufnahmen der durch den Pinauszug entstandenen Löcher für Prüfkörper, die quasi-statisch bzw. schwingend belastet wurden. Deutlich zu erkennen ist dabei die vor allem in Probenlängsrichtung auftretende Ausweitung der Löcher durch das wiederholte Hinein- und Herausgleiten der Pins. Dass diese Abriebeffekte zu einer Verringerung der Brückenkräfte führt, wurde bereits experimentell anhand von Pullout-Untersuchungen unter schwingender Beanspruchung nachgewiesen [32, 104]. Mit zunehmender Lastwechselzahl konnte dabei eine stetige Abnahme der zwischen Pin und Laminat übertragenen Reibkräfte festgestellt werden. Es ist daher wahrscheinlich, dass diese Verschleißeffekte mit zunehmender Lastwechselzahl, auch unter Mode-I-Beanspruchung, zu einer deutlichen Annäherung der durch die unterschiedlichen Pingeometrien übertragbaren Brückenkräfte führen. Entsprechend der gegenüber UD-Laminaten deutlicheren Steigerung der bruchmechanischen Eigenschaften unter quasi-statischer Belastung ist die Überlegenheit rechteckiger z-Pins unter schwingender Beanspruchung daher lediglich in quasi-isotropen FKV eindeutig nachweisbar.



### 4.3 Experimentelle Untersuchungen

---

Die Ergebnisse der Untersuchungen unter schwingender Mode-I-Beanspruchung zeigen zusätzlich, dass sich der Gradient  $M$  der Rissfortschrittskurven durch die Einbringung von z-Pins gegenüber unverpinnten Laminaten leicht erhöht. Da dieser ein Maß für die Anfälligkeit der Prüfkörper gegenüber einer Erhöhung der Beanspruchungsamplitude darstellt, zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass z-Pin-verstärkte Lamine zwar eine erhöhte Ermüdungsfestigkeit gegenüber unverpinnten FKV aufweisen, jedoch auch geringfügig anfälliger gegenüber einer Erhöhung der Beanspruchung sind, sobald ihr jeweiliger Grenzwert zum Einsetzen des Rissfortschritts überschritten wurde. Ein spürbarer Einfluss der Pingeometrie bzw. der Ausrichtung der rechteckigen z-Pins auf den Gradienten der Rissfortschrittskurven ist hingegen nicht festzustellen.

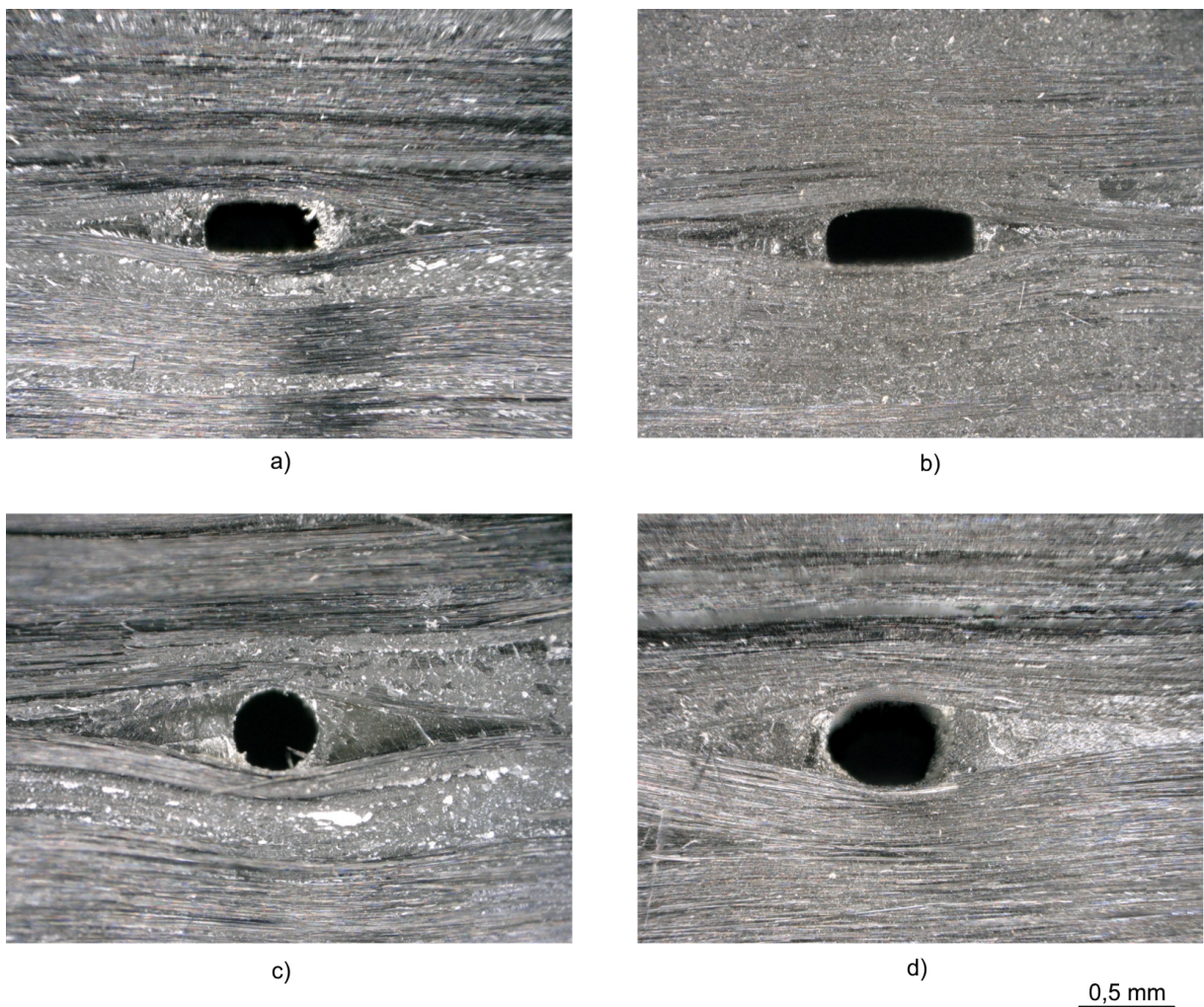


Abbildung 4.27: Beim DCB-Versuch entstehende Löcher (a) rechteckiger z-Pins unter quasi-statischer und (b) schwingender Beanspruchung sowie (c) kreisrunder z-Pins unter quasi-statischer und (d) schwingender Beanspruchung

### 4.3.3 Bruchmechanische Eigenschaften unter Mode-II-Beanspruchung

In Abbildung 4.28 sind charakteristische Kraft-Weg-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung dargestellt. Eine Erzeugung von Risslängen, die über den halben Auflagerabstand  $L/2$  hinausgehen sind im ENF-Versuch nicht möglich [9]. Alle dargestellten Kraft-Weg-Verläufe zeigen daher lediglich das Verhalten der Prüfkörper bis zum Erreichen dieses Punktes.

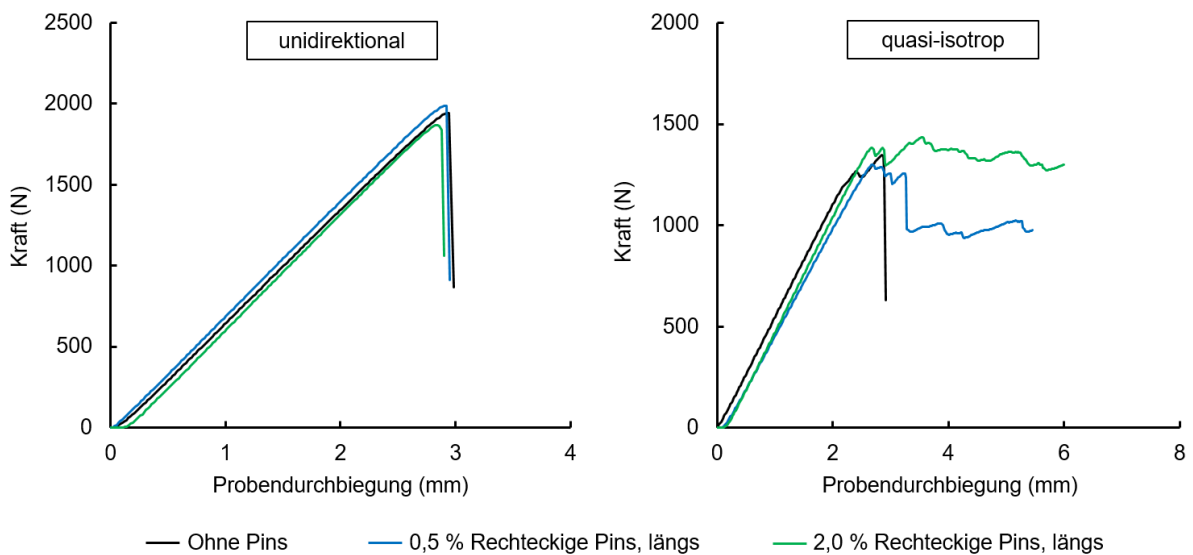


Abbildung 4.28: Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-II-Beanspruchung

Unabhängig vom verwendeten Laminataufbau weisen dabei alle Proben einen anfänglichen linearen Anstieg der Kraft auf, bis das Einsetzen des Risswachstums durch den plötzlichen Abfall der gemessenen Kraft angezeigt wird. In unidirektionalen Laminaten konnte dabei sowohl für unverpinnte als auch z-Pin-verstärkte Prüfkörper ein instabiles Risswachstum bis zur maximalen Risslänge von 90 mm festgestellt werden. In QI-Laminaten wurde ein solches Verhalten hingegen lediglich für Proben beobachtet, die nicht durch z-Pins verstärkt waren. In verpinnten quasi-isotropen Prüfkörpern wurde das einsetzende instabile Risswachstum durch die eingebrachte z-Pin-Verstärkung gestoppt und in ein stabiles Risswachstum umgewandelt. In den Kraft-Weg-Verläufen drückt sich dieses Verhalten durch einen deutlich weniger stark ausgeprägten Kraftabfall und das bis zum Erreichen der maximalen Risslänge annähernd konstante Kraftniveau aus.

Das trotz z-Pin-Verstärkung beobachtete instabile Risswachstum unidirektionaler Prüfkörper ist dabei auf den hohen Energiegehalt, der mit dem einsetzenden Rissfortschritt schlagartig frei wird, zurückzuführen. Aufgrund der hohen Dynamik sind die z-Pins nicht



in der Lage ausreichende Brückenkräfte zur Verfügung zu stellen, um das einsetzende Risswachstum, wie für quasi-isotrope Proben beobachtet, zu stoppen. Wenngleich für einen geringeren Pingegehalt, berichtet Cartie [8] von einem ähnlichen Verhalten unidirektionaler ENF-Prüfkörper, welche mit kreisrunden z-Pins und einem Pingegehalt von 0,5 % verstärkt waren. Da die verwendeten quasi-isotropen Prüfkörper eine deutlich geringere Steifigkeit aufweisen, wird in diesen mit einsetzendem Risswachstum weniger Energie frei und das instabile Fortschreiten des Risses kann durch die eingebrachte z-Pin-Verstärkung frühzeitig gestoppt werden.

Aufgrund des schlagartigen Versagens unidirektionaler Prüfkörper ist eine Darstellung der kritischen Energiefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Risslänge für diese Lamine nicht möglich. In Abbildung 4.29 sind daher lediglich für quasi-isotrope Lamine charakteristische Risswiderstandskurven in Abhängigkeit von der Pingeometrie und dem Pingegehalt längs ausgerichteter rechteckiger z-Pins dargestellt. Diese zeigen, dass die Einbringung von z-Pins auch unter Mode-II-Beanspruchung keinen Einfluss auf die kritische Energiefreisetzungsrate bei Einsetzen des Risswachstums ausübt. Erst mit zunehmender Risslänge und der Ausbildung einer Brückenzone im Laminat steigt  $G_{IIC}$  kontinuierlich an. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass sich, anders als für die Untersuchungen unter Mode-I-Beanspruchung beschrieben, bis zum Erreichen der maximal möglichen Risslänge von 90 mm keine Sättigung der Risswiderstandskurven einstellt. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits in früheren Untersuchungen zum Verhalten kreisrunder z-Pins beschrieben [8, 9, 60] und ist daher für Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchungen nicht unüblich.

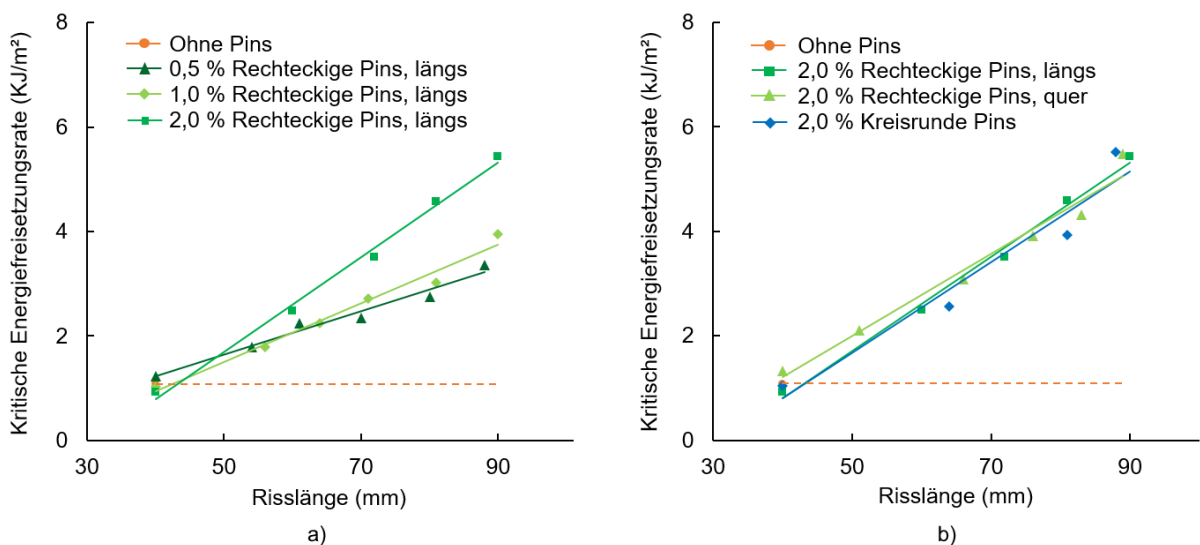


Abbildung 4.29: Abhängigkeit der Risswiderstandskurven quasi-isotroper Prüfkörper unter Mode-II-Beanspruchung vom (a) Pingegehalt und (b) der Pingeometrie

### 4.3 Experimentelle Untersuchungen

In Tabelle 4.3 sind die Ergebnisse der Untersuchungen unter quasi-statischer Mode-II-Beanspruchung zusammengefasst. Während das Einbringen von z-Pins in beiden Laminaten keinen spürbaren Einfluss auf die Rissinitiierung ausübt, konnte die ermittelte Risszähigkeit mit fortschreitendem Risswachstum gegenüber unverpinnten Laminaten zum Teil signifikant gesteigert werden. Aufgrund der fehlenden Sättigung der Risswiderstandskurven ist dabei eine exakte Angabe der ermittelten  $G_{IIC}$ -Werte nicht möglich. Dennoch ist anhand der dargestellten Ergebnisse erkennbar, dass die Einbringung von z-Pins zu einer Steigerung der kritischen Energiefreisetzungsrate führt. Diese fällt im Gegensatz zu den Ergebnissen der Mode-I-Untersuchungen jedoch spürbar geringer aus.

Tabelle 4.3: Versuchsergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen unter quasi-statischer Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt	$G_{IIC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
UD	-	-	0,0 %	$1,63 \pm 0,11$
UD	eckig	längs	0,5 %	-
UD	eckig	längs	1,0 %	-
UD	eckig	längs	2,0 %	-
UD	eckig	quer	2,0 %	-
UD	rund	-	2,0 %	-
QI	-	-	0,0 %	$1,11 \pm 0,17$
QI	eckig	längs	0,5 %	$\geq 3,63 \pm 0,20$
QI	eckig	längs	1,0 %	$\geq 4,01 \pm 0,30$
QI	eckig	längs	2,0 %	$\geq 5,53 \pm 0,58$
QI	eckig	quer	2,0 %	$\geq 5,46 \pm 0,24$
QI	rund	-	2,0 %	$\geq 5,52 \pm 0,23$

Wie in Abbildung 4.30 am Beispiel eines längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins dargestellt, ist das im Rahmen der experimentellen Untersuchungen beobachtete Versagen der z-Pin-Verstärkung durch einen Scherbruch in der Rissebene der Prüfkörper gekennzeichnet. Dass dabei weder ein sichtbarer Auszug der Pins aus dem Laminat noch eine nennenswerte Verformung der Pins beobachtet werden konnte, deutet auf ein Versagen der verwendeten Pins bei geringen Rissöffnungsverschiebungen hin. Pegorin et al. [9] berichten jedoch aufgrund der generierten Reibung zwischen der rauen Bruchkante der Pins und der gegenüberliegenden Rissflanke auch nach vollständigem Versagen der Pins von einer weiteren Übertragung von Brückenkräften. Trotz des frühzeitigen Versagens der verwendeten z-Pins kann sich auf diese Weise eine ausreichend lange Brückenzone in den getesteten Prüfkörpern ausbilden, welche zu der dargestellten Steigerung der Risszähigkeit mit zunehmender Risslänge führt.

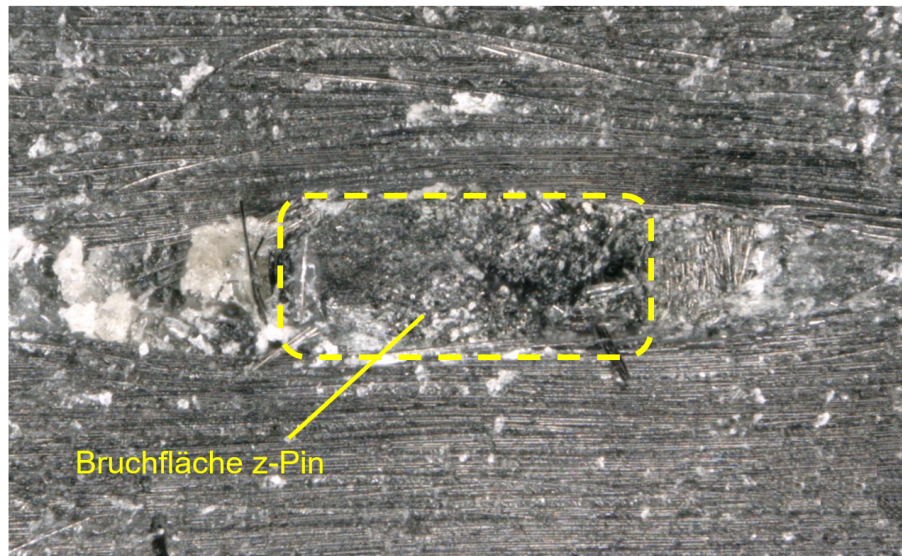


Abbildung 4.30: Charakteristisches Versagensbild der getesteten z-Pin-Verstärkung unter Mode-II-Beanspruchung

Aufgrund des beschriebenen Versagensverhaltens wird der im Rahmen dieser Arbeit ermittelte Widerstand gegen das Ausbreiten von Rissen unter Mode-II-Beanspruchung überwiegend von der Querschnittsfläche der Gesamtheit an eingebrachten z-Pins beeinflusst. In QI-Laminaten konnte daher folgerichtig für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins eine Erhöhung der kritischen Energiefreisetzungsrate mit zunehmendem Pingegehalt festgestellt werden. Ein Einfluss der Pingeometrie auf die erzielte Mode-II-Risszähigkeit quasi-isotroper FKV konnte hingegen, entsprechend der nahezu identischen Querschnittsfläche kreisrunder und rechteckiger z-Pins, nicht beobachtet werden.

Das instabile Risswachstum innerhalb der unidirektionalen Prüfkörper lässt im Rahmen dieser Arbeit keine gesicherten Rückschlüsse auf den Einfluss von Pingegehalt und Pingeometrie auf die Risszähigkeit von UD-Laminaten zu. Im Zusammenhang mit kreisrunden z-Pins konnte jedoch in vergleichbaren wissenschaftlichen Untersuchungen auch in unidirektionalen Laminaten eine Erhöhung der kritischen Energiefreisetzungsrate mit steigendem Pingegehalt festgestellt werden [8, 9, 60]. Es ist daher wahrscheinlich, dass sich unter Verwendung alternativer Prüfkörpergeometrien auch für rechteckige z-Pins eine ähnliche Abhängigkeit der erzielten Risszähigkeit vom Pingegehalt einstellen würde.

Abbildung 4.31 zeigt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins den Einfluss des Pingegehalts auf die Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Laminat. Die Ergebnisse zeigen, dass das Einbringen von z-Pins einen spürbaren Einfluss auf die bruchmechanischen Eigenschaften unter schwingender Mode-II-Beanspruchung ausübt. Mit zunehmendem Pingegehalt werden die Rissfortschrittskurven dabei nicht wie für Mode-I-

### 4.3 Experimentelle Untersuchungen

Beanspruchungen beschrieben annähernd parallel in Richtung höherer Beanspruchungsamplituden verschoben. Stattdessen konnte eine stetige Abnahme des Gradienten der Kurven mit steigender Anzahl eingebrachter z-Pins festgestellt werden. Die abnehmende Sensitivität der Rissfortschrittskurven z-Pin-verstärkter Prüfkörper führt demnach vor allem bei großen Beanspruchungsamplituden zu einer Reduzierung der Rissfortschrittschwindigkeiten gegenüber unverpinnten Laminaten.

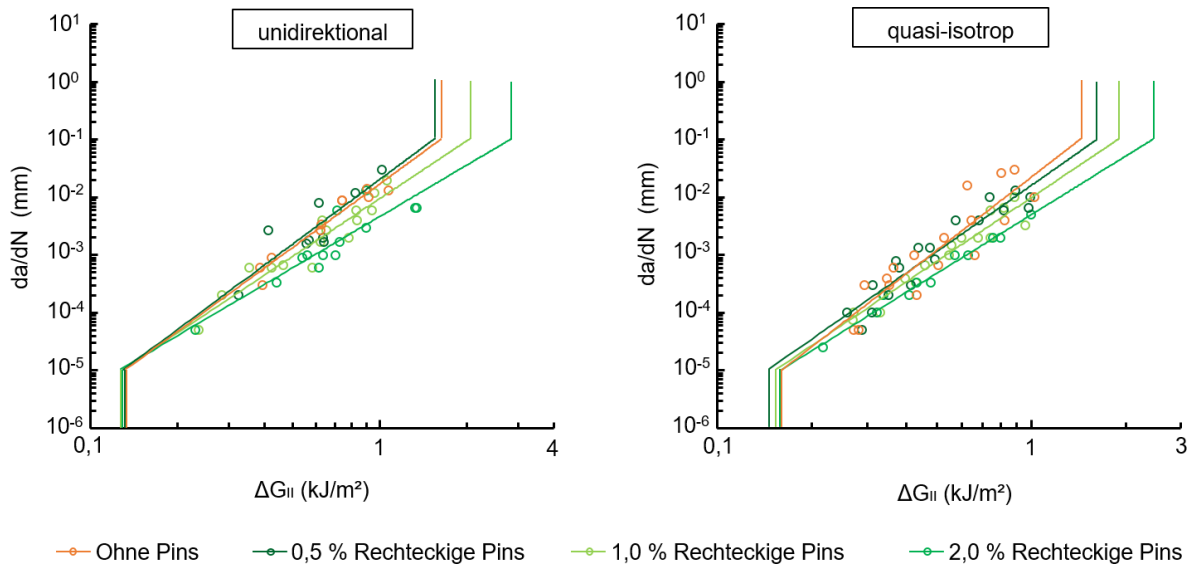


Abbildung 4.31: Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit vom Pin Gehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins

Analog zu den Untersuchungen unter Mode-I-Beanspruchung mussten die Grenzwerte für einsetzendes Risswachstum  $\Delta G_{II,th}$  und instabiles Risswachstum  $\Delta G_{II,c}$  künstlich festgelegt werden. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Pegorin et al. [71] erfolgte die Bestimmung der beiden Grenzwerte bei Risswachstumsgeschwindigkeiten von 0,1 mm ( $\Delta G_{II,c}$ ) bzw.  $10^{-5}$  mm ( $\Delta G_{II,th}$ ). Die auf diese Weise ermittelten Grenzwerte sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Das Einbringen von rechteckigen z-Pins übt demnach keinen Einfluss auf das Einsetzen des Risswachstums aus. Aufgrund des reduzierten Gradienten der Rissfortschrittskurven steigt hingegen der Grenzwert für instabiles Risswachstum mit zunehmendem Pin Gehalt an. Die maximale Steigerung von  $\Delta G_{II,c}$ , die mit längs ausgerichteten rechteckigen Pins und einem Pin Gehalt von 2,0 % erreicht werden konnte, beträgt in Abhängigkeit vom Laminataufbau 73 % in unidirektionalen bzw. 70 % in quasi-isotropen Prüfkörpern. Im Gegensatz zu den quasi-statischen Untersuchungen konnte demnach unter schwingender Beanspruchung durchaus ein positiver Einfluss rechteckiger z-Pins auf die bruchmechanischen Mode-II-Eigenschaften unidirektionaler FKV-Lamine festgestellt werden.

### 4.3 Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 4.4: Versuchsergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen unter schwingender Mode-II-Rissöffnungsbeanspruchung

Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt	$\Delta G_{II,th}$	$\Delta G_{II,c}$	M
UD	-	-	0,0 %	0,13 kJ/m <sup>2</sup>	1,62 kJ/m <sup>2</sup>	3,7
UD	eckig	längs	0,5 %	0,13 kJ/m <sup>2</sup>	1,53 kJ/m <sup>2</sup>	3,7
UD	eckig	längs	1,0 %	0,13 kJ/m <sup>2</sup>	2,03 kJ/m <sup>2</sup>	3,3
UD	eckig	längs	2,0 %	0,13 kJ/m <sup>2</sup>	2,81 kJ/m <sup>2</sup>	3,0
UD	eckig	quer	2,0 %	0,14 kJ/m <sup>2</sup>	2,79 kJ/m <sup>2</sup>	3,1
UD	rund	-	2,0 %	0,16 kJ/m <sup>2</sup>	2,89 kJ/m <sup>2</sup>	3,2
QI	-	-	0,0 %	0,16 kJ/m <sup>2</sup>	1,43 kJ/m <sup>2</sup>	4,2
QI	eckig	längs	0,5 %	0,14 kJ/m <sup>2</sup>	1,62 kJ/m <sup>2</sup>	3,8
QI	eckig	längs	1,0 %	0,15 kJ/m <sup>2</sup>	1,89 kJ/m <sup>2</sup>	3,7
QI	eckig	längs	2,0 %	0,16 kJ/m <sup>2</sup>	2,43 kJ/m <sup>2</sup>	3,4
QI	eckig	quer	2,0 %	0,14 kJ/m <sup>2</sup>	2,33 kJ/m <sup>2</sup>	3,3
QI	rund	-	2,0 %	0,13 kJ/m <sup>2</sup>	2,49 kJ/m <sup>2</sup>	3,2

Der Einfluss der Pingeometrie auf die Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Analog der dargestellten Ergebnisse der quasi-statischen Untersuchungen, konnte unter schwingender Mode-II-Beanspruchung kein spürbarer Unterschied zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins hinsichtlich ihres Einflusses auf die Rissfortschrittskurven z-Pin-verstärkter Lamine ermittelt werden.

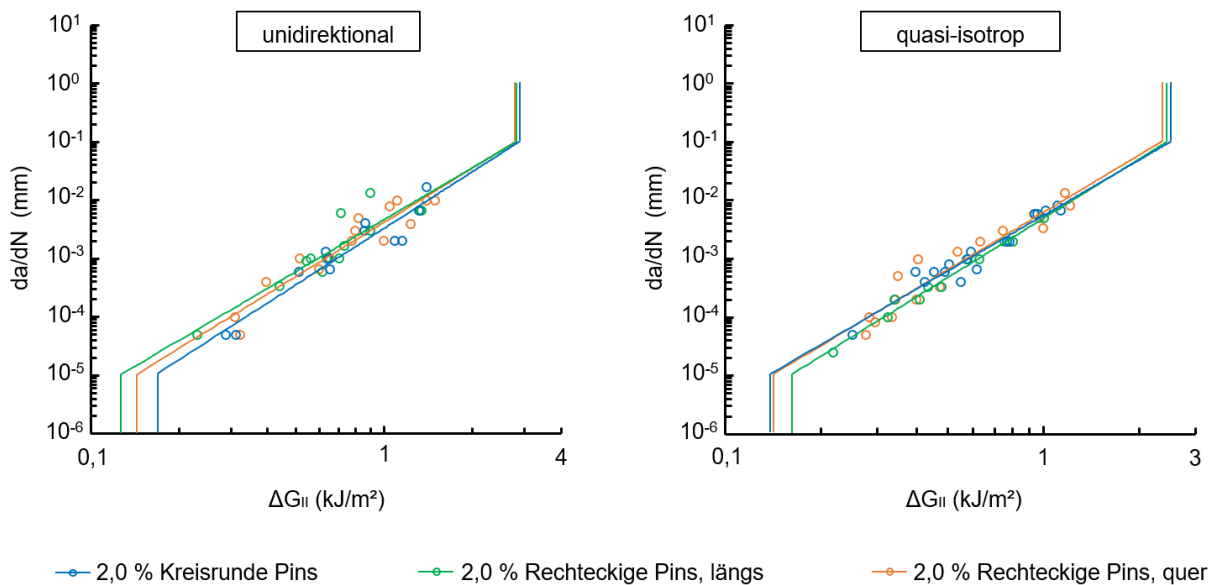


Abbildung 4.32: Rissfortschrittskurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Mode-II-Beanspruchung in Abhängigkeit von der Pingeometrie

#### 4.3.4 Zugsteifigkeit und -festigkeit

Der Einfluss von rechteckigen z-Pins auf die erzielten Spannungs-Dehnungs-Kurven ist in Abbildung 4.33 anhand von charakteristischen Proben dargestellt. Unabhängig von Pingealt, Pingeometrie und Laminataufbau zeigen alle Kurven einen für CFK-Werkstoffe typischen linearen Verlauf bis zum schlagartigen Versagen der Probe. Einige Kraft-Weg-Verläufe z-Pin-verstärkter Prüfkörper weisen dabei mehr oder wenig stark ausgeprägte Dehnungssprünge auf. Diese entstehen immer dann, wenn ein Messarm des verwendeten Extensometers im Vorfeld der Versuche auf einem oder mehreren Pins platziert werden musste. Während der Längenänderung der Probe rutscht das Extensometer von den leicht aus dem Laminat hervorstehenden z-Pins ab und fällt auf das Grundlaminat zurück. Da diese Sprünge lediglich bei einer ausreichend großen Längenänderung zu beobachten waren, wirken sich diese nicht auf die Ermittlung der Zugsteifigkeit der Proben aus.

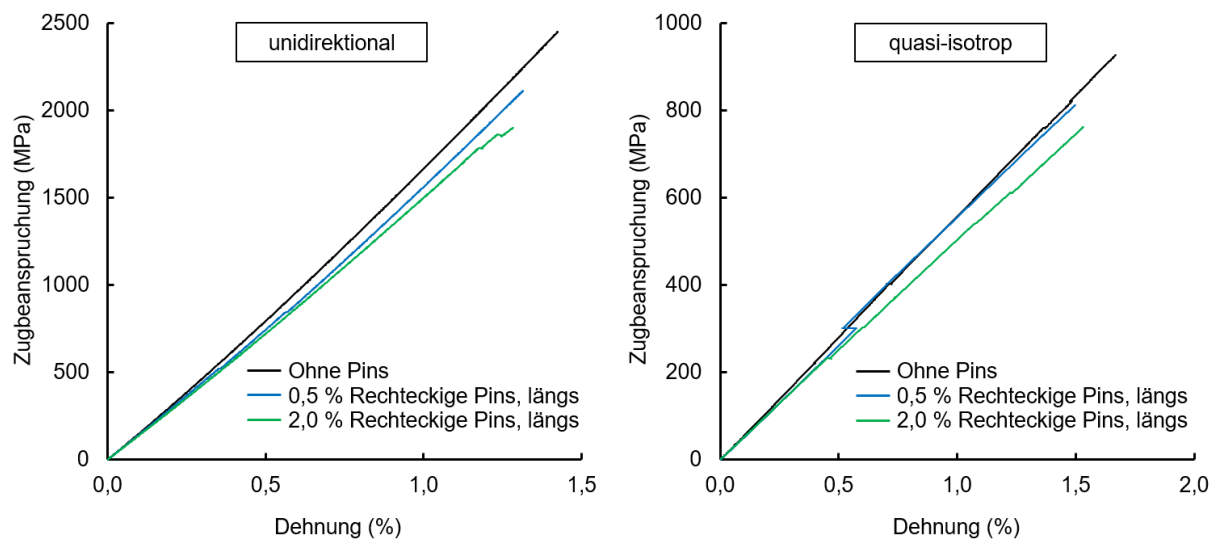
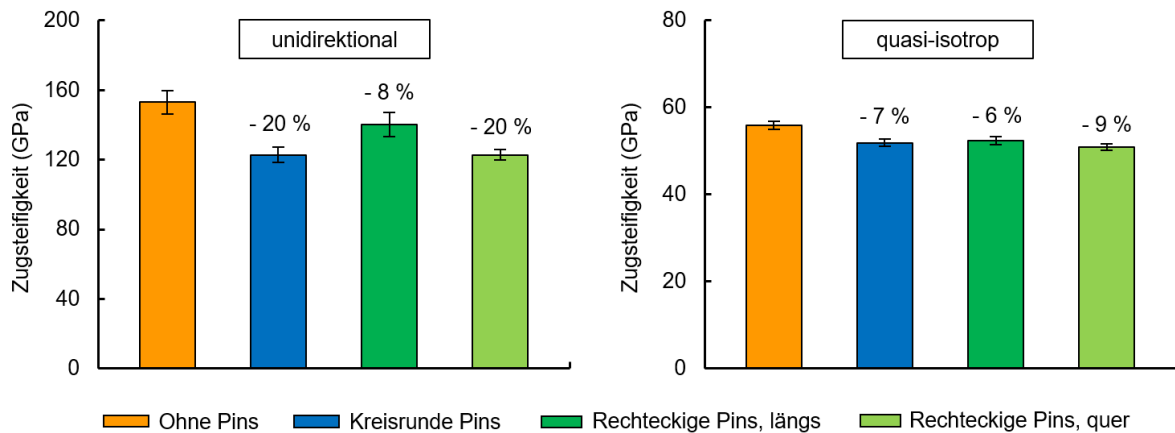


Abbildung 4.33: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Zugbeanspruchung

Zum Vergleich des Einflusses der unterschiedlichen Pingeometrien auf die Zugsteifigkeit von FKV-Werkstoffen sind in Abbildung 4.34 die mittleren Zugmodule für unverpinnte Prüfkörper sowie für Proben, in die kreisrunde bzw. rechteckige z-Pins mit einem Pingealt von 2,0 % eingebracht wurden, dargestellt. In beiden Laminaten ist eine Abnahme der Steifigkeit mit zunehmender Störbreite erkennbar. In unidirektionalen FKV konnte in Verbindung mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins eine Reduzierung der Steifigkeit um 8 % festgestellt werden. Kreisrunde und quer ausgerichtete rechteckige z-Pins führten, verglichen mit unverpinnten Laminaten, jeweils zu einer Abnahme des E-Moduls um 20 %. Im Gegensatz dazu zeigen quasi-isotrope Lamine eine deutlich geringere Anfäll-



ligkeit gegenüber einer Erhöhung der Störbreite. Einer Steifigkeitsabnahme von 6 % bei längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins steht hier bei steigender Störbreite lediglich eine geringe Zunahme der Degradation auf 7 % für kreisrunde bzw. 9 % für quer ausgerichtete rechteckige z-Pins gegenüber.



Abbildungung 4.34: Abhängigkeit der Zugsteifigkeit von der Pin-Geometrie für unidirektionale und quasi-isotrope Laminat

Die im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelte Degradation der Steifigkeit durch das Einbringen von z-Pins fällt im Vergleich zu den Ergebnissen vergleichbarer externer Untersuchungen deutlich stärker aus. Nicht zuletzt aufgrund der starken Abhängigkeit der Ergebnisse von den verwendeten Ausgangsmaterialien schwanken die Angaben aus externen Untersuchungen an unidirektionalen Laminaten für einen Pin-gehalt von 2 % zwischen einer Steifigkeitsreduzierung von 2 % für z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm [6] und einer Degradation von 10 % in Verbindung mit dickeren z-Pins ( $\varnothing 0,51$  mm) [40]. Lediglich Grassi et al. [79] konnten in ihrer numerischen Untersuchung in Verbindung mit kreisrunden z-Pins (2 %,  $\varnothing 0,28$  mm), deren Störbreite etwa denen der längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins entspricht, eine vergleichbare Steifigkeitsabnahme von ca. 11 % in unidirektionalen bzw. 7 % in quasi-isotropen FKV feststellen. Eine Abnahme der Steifigkeit gegenüber unverpinnten Laminaten erfolgt hauptsächlich aufgrund der infolge der Einbringung von z-Pins entstehenden Umlenkung der lasttragenden Fasern. Die im Rahmen dieser Arbeit festgestellte erhöhte Steifigkeitsabnahme ist daher überwiegend auf die in Abschnitt 4.1.1 dargestellte, gegenüber vergleichbaren Untersuchungen erhöhte Faserwelligkeit zurückzuführen und somit als plausibel einzustufen.

Ein Vergleich des Einflusses der Pin-Geometrien und -ausrichtungen zeigt, dass kreisrunde z-Pins aufgrund der größeren Störbreite gegenüber längs ausgerichteten rechteckigen Pins in beiden Laminattypen eine stärkere Reduzierung der Zugsteifigkeit verursachen. Dieser Unterschied ist, trotz der nominell größeren Störbreite, zwischen kreisrunden und quer

ausgerichteten rechteckigen z-Pins in unidirektionalen Laminaten nicht festzustellen. Wie in Abschnitt 4.1.4 im Zusammenhang mit den Mikrostrukturuntersuchungen beschrieben, dreht sich ein gewisser Anteil der ursprünglich quer eingebrachten rechteckigen Pins während des Einbringprozesses um  $90^\circ$  und liegt damit im ausgehärteten Bauteil längs ausgerichtet vor. In Summe führt dies zu einer durchschnittlichen Störbreite der Pins, die mit der kreisrunder z-Pins vergleichbar ist. Da die Steifigkeit z-Pin-verstärkter Laminat hauptsächlich von der Höhe der Faserwelligkeitswinkel abhängig ist, erscheinen die in unidirektionalen Prüfkörpern erzielten Ergebnisse plausibel. Im Gegensatz dazu zeigen quasi-isotrop aufgebaute Laminat ein anderes Verhalten. Da eine Drehung der Pins während der Einbringung in einen ausgeglichenen Winkelverbund ausbleibt, führt die größere Störbreite der quer zur Belastungsrichtung orientierten rechteckigen z-Pins folgerichtig gegenüber kreisrunden Pins zu einer stärkeren Abnahme der Zugsteifigkeit.

In Abbildung 4.35 ist die Abhängigkeit der Zugsteifigkeit vom Pingehalt für unidirektionale und quasi-isotrope Laminat, welche mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins verstärkt wurden dargestellt. In beiden Laminataufbauten zeigt sich dabei bis zum höchsten untersuchten Pingehalt von 2,0 % eine lineare Abhängigkeit. In der Neigung der beiden Geraden spiegelt sich die unterschiedliche Anfälligkeit der Laminataufbauten gegenüber einer z-Pin-Verstärkung wider. Während in UD-Laminaten eine Erhöhung des Pingehalts um 1 % zu einer Abnahme der Zugsteifigkeit um 4 % (6,10 GPa) führt, weisen die getesteten QI-Prüfkörper lediglich eine Reduzierung von 3 % (1,55 GPa) bei jeder Erhöhung des Pingehalts um 1 % auf.

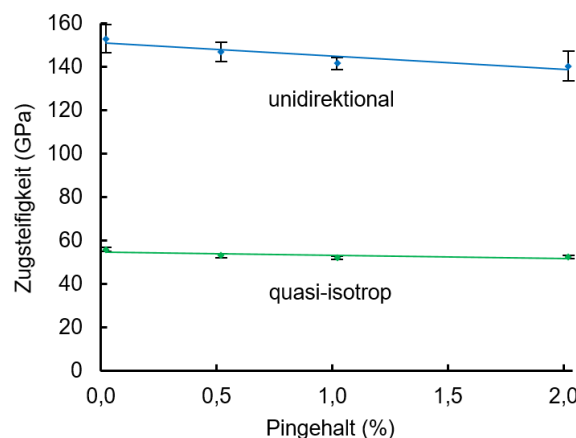


Abbildung 4.35: Abhängigkeit der Zugsteifigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Laminat vom Pingehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins



Die dargestellte lineare Abhängigkeit der Steifigkeitsreduktion vom Pingegehalt unter Verwendung rechteckiger z-Pins entspricht grundlegend dem allgemein beschriebenen Verhalten z-Pin-verstärkter Lamine [6, 14, 15, 39, 41, 75]. Aufgrund der zuvor dargestellten, gegenüber vergleichbaren Untersuchungen erhöhten Steifigkeitsabnahme fällt entsprechend auch die Sensibilität der Zugsteifigkeit gegenüber einer Zunahme des Pingegehalts stärker aus. Dass unidirektionale Lamine, aufgrund ihres höheren Anteils an zur Steifigkeit beitragenden  $0^\circ$ -Fasern, stärker auf eine Erhöhung der Anzahl rechteckiger Pins reagieren als quasi-isotrope FKV, entspricht ebenfalls den Ergebnissen externer Untersuchungen zum Verhalten kreisrunder z-Pins [6, 39, 41, 79].

Die erzielten mittleren Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von Pingeometrie und -ausrichtung sind in Abbildung 4.36 für einen Pingegehalt von 2,0 % dargestellt. Die Degradation der Zugfestigkeit in verpinnten unidirektionalen Laminen beträgt für rechteckige z-Pins 24 % (längs) bzw. 47 % (quer). Kreisrunde z-Pins führen, verglichen mit unverpinnten Laminen, zu einer Reduzierung der Festigkeit um 43 %. Analog zu den Beobachtungen hinsichtlich der Zugsteifigkeit weisen quasi-isotrope Proben eine deutlich geringere Anfälligkeit gegenüber einer z-Pin-Verstärkung auf. Die Degradation der Zugfestigkeit beträgt hier 14 % bzw. 29 % für längs und quer ausgerichtete rechteckige Pins. Die Verwendung von kreisrunden z-Pins führte in QI-Laminen zu einer Abnahme der Festigkeit um 20 %.

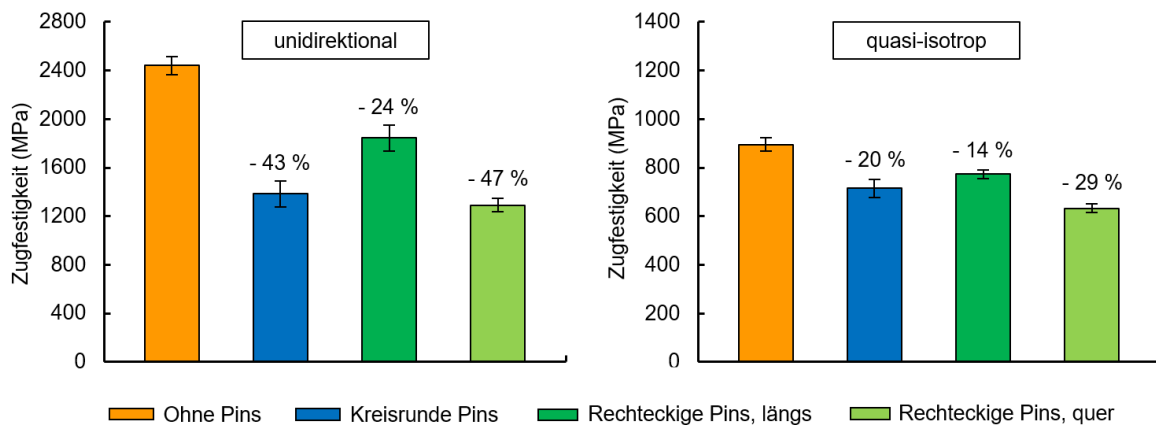


Abbildung 4.36: Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Pingeometrie für unidirektionale und quasi-isotrope Lamine

Analog zu den Zugsteifigkeiten unterscheidet sich auch die im Rahmen dieser Untersuchungen festgestellte Degradation der Zugfestigkeit von den Angaben aus vergleichbaren externen Untersuchungen. Diese reichen für einen Pingegehalt von 2 % von einer Festigkeitsabnahme von 11 % für z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm [40] bis hin zu einer Degradation von 25 % ( $\varnothing$  0,51 mm) [6, 41] und liegen damit zum Teil deutlich unterhalb der in dieser Arbeit ermittelten Werte. In QI-Laminen zeigt sich ein vergleichbares

Bild. Hier beschreiben Chang et al. [6, 41] eine maximale Festigkeitsabnahme von 7 % für kreisrunde z-Pins und einen Pingehalt von 4 %. Diese unterschreitet, trotz vergleichbarer Störbreite und eines höheren Pingehalts, die in dieser Arbeit für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins ermittelten Werte deutlich. Auch wenn dies anhand von Mikrostrukturuntersuchungen nicht direkt nachweisbar ist, würde diese Diskrepanz auf eine, gegenüber den genannten externen Untersuchungen, erhöhte Anzahl gebrochener Fasern im Laminat hindeuten, die entweder auf die abweichende Geometrie der Spitze der verwendeten z-Pins oder auf die Materialeigenschaften des verwendeten Prepregs zurückzuführen sein könnte.

Auch im Zusammenhang mit der Zugfestigkeit konnte eine kontinuierliche Reduzierung mit zunehmender Störbreite festgestellt werden. Im Gegensatz zur Zugsteifigkeit gilt diese Aussage auch für die Verwendung von quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins in UD-Laminaten. In diesen liegt zwar ein Großteil der ursprünglich quer eingebrachten z-Pins längs zur Faserrichtung orientiert vor, die Drehung der Pins vollzieht sich jedoch erst allmählich während des Einbringprozesses. Aufgrund des großen Eindringwiderstands verursachen diese daher, verglichen mit kreisrunden z-Pins, vor allem zu Beginn der Einbringung stärkere Schädigungen im Laminat. Da die dabei entstehenden Faserbrüche hauptsächlich für die Degradation der Festigkeit im Zusammenhang mit einer z-Pin-Verstärkung sind, erscheinen die Ergebnisse trotz der beschriebenen Drehung der rechteckigen Pins nachvollziehbar. In quasi-isotropen Laminaten findet keine Drehung der quer eingebrachten rechteckigen Pins statt. Die prozentualen Unterschiede in der Zugfestigkeit zwischen Prüfkörpern mit kreisrunden und quer eingebrachten rechteckigen z-Pins sind daher entsprechend größer als in den UD-Laminaten.

Abbildung 4.37 zeigt den Einfluss des Pingehalts auf die Zugfestigkeit von unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten, welche mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins verstärkt wurden. Analog zur Zugsteifigkeit zeigt sich auch hier ein linearer Zusammenhang, wobei sowohl die Empfindlichkeit der Zugfestigkeit gegenüber einer z-Pin-Verstärkung als auch die Unterschiede im Verhalten zwischen den Laminataufbauten deutlich größer ausfallen. In UD-Laminaten konnte demnach eine Reduzierung der Zugfestigkeit um 12 % (277 MPa) bei einer Erhöhung des Pingehalts um 1 % festgestellt werden. Demgegenüber steht eine Abnahme von 6 % (51 MPa) bei jeder Erhöhung des Pingehalts um 1 % in QI-Prüfkörpern. Die beschriebene Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Pingehalt unter Verwendung rechteckiger z-Pins entspricht damit dem allgemein beschriebenen Verhalten z-Pin verstärkter Laminat [6, 14, 15, 39, 41, 75], wobei auch hier die gegenüber vergleichbaren Untersuchungen insgesamt stärkere Degradation der Zugfestigkeit zu einer erhöhten Sensibilität gegenüber einer Zunahme des Pingehalts führt.

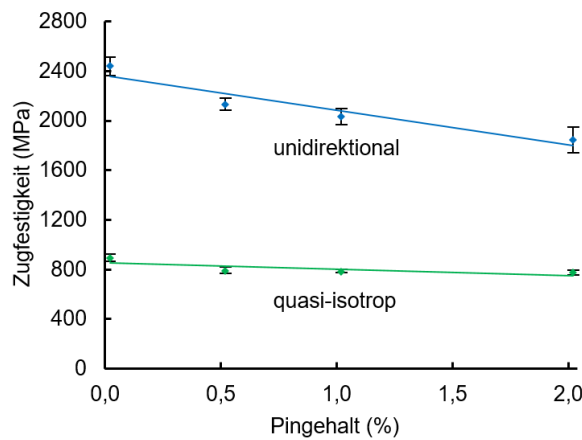


Abbildung 4.37: Abhängigkeit der Zugfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine vom Pingegehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins

Die Ergebnisse zeigen, dass die verwendeten rechteckigen z-Pins, solange sie längs zur Belastungsrichtung orientiert sind, gegenüber kreisrunden Pins zu einer Erhöhung der erzielbaren Zugsteifigkeit und –festigkeit führen. Aufgrund der vergrößerten Störbreite verlieren rechteckige Pins jedoch ihre vorteilhaften Eigenschaften, wenn diese quer zur Belastungsrichtung im Laminat ausgerichtet werden. Wenn auch unter Verwendung von unterschiedlichen Einbring- und Aushärteverfahren, kommen Knaupp et al. [14, 15] in ihren Untersuchungen an z-Pin-verstärkten, kaltaushärtenden CFK-Laminaten zu ähnlichen Ergebnissen. In diesen Werkstoffen konnten durch die Verwendung von längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins aufgrund geringerer Faserumlenkungswinkel sowie einer verringerten Anzahl an Faserbrüchen gegenüber kreisrunden z-Pins ebenfalls erhöhte Steifigkeits- und Festigkeitswerte erzielt werden.

Auch das Versagensverhalten z-Pin-verstärkter und unverpinnter Prüfkörper unterscheidet sich deutlich. Zwar zeigten alle Prüfkörper bei Erreichen ihrer Belastungsgrenze ein plötzliches und katastrophales Versagensverhalten, unidirektionale Lamine ohne z-Pin-Verstärkung versagten dabei jedoch größtenteils durch den Bruch der Verstärkungsfasern, begleitet von einer geringen Anzahl von Längsrissen in der Probe (vgl. Abbildung 4.38.a). Demgegenüber zeigten Prüfkörper mit z-Pin-Verstärkung, durch die Ausbildung einer deutlich größeren Anzahl von Längsrissen in der Probe ein signifikant unterschiedliches Versagensverhalten (Abbildung 4.38.b). Unterschiede im Versagensverhalten für verschiedene Pingeometrien, -ausrichtungen und Pingegehalte wurden hingegen nicht festgestellt. Im Gegensatz zu UD-Laminaten konnte für quasi-isotrope Prüfkörper keine Änderung im Versagensverhalten durch die Einbringung von z-Pins in den Werkstoff festgestellt werden. Sämtliche QI-Prüfkörper versagten durch Faserbruch in den 0°-Lagen, begleitet von Zwischenfaserbrüchen in den 45°- bzw. 90°-Lagen (Abbildung 4.38.c bzw. 4.38.d)

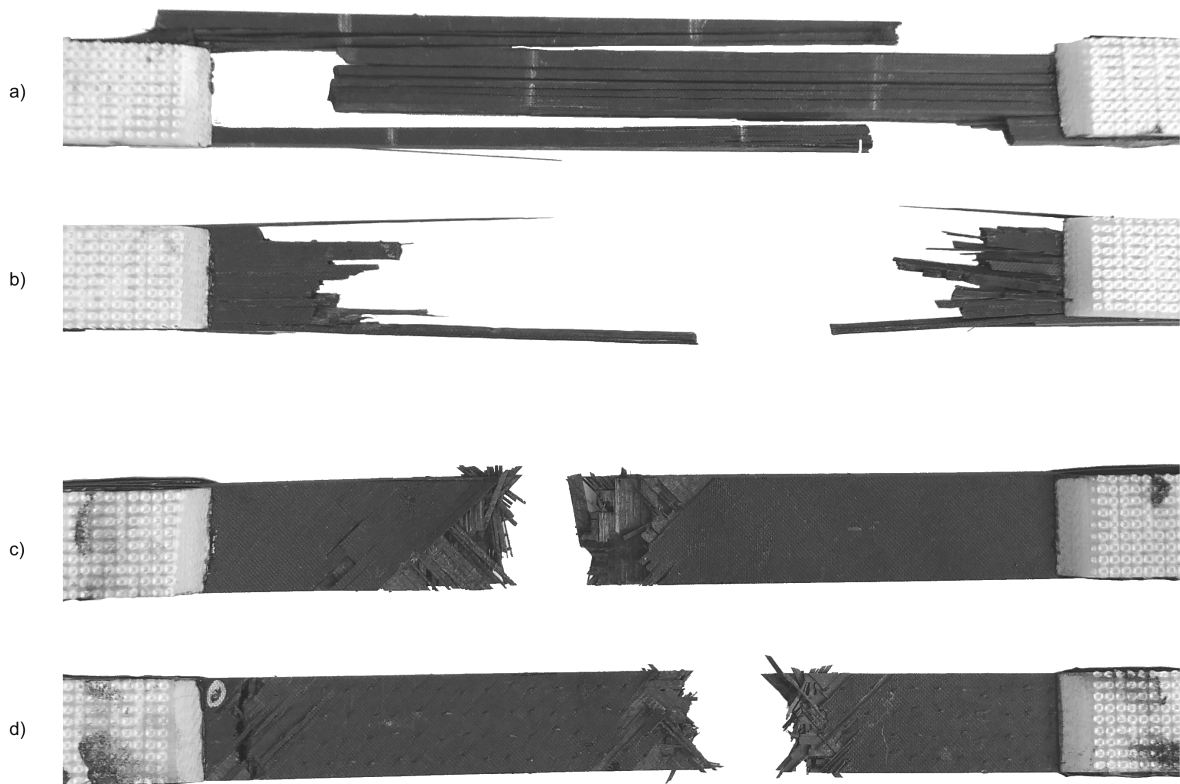


Abbildung 4.38: Versagen unidirektionaler Lamine (a) ohne z-Pin-Verstärkung und (b) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins sowie quasi-isotroper Lamine (c) ohne z-Pin-Verstärkung und (d) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins unter quasi-statischer Zugbelastung

Eine ausführliche Analyse des Versagensmechanismus unidirektionaler FKV-Lamine mit z-Pin-Verstärkung unter Zugbelastung liefern Chang et al. [41] und Mouritz et al. [39]. Diese berichten von kleinen Rissen in den harzreichen Zonen, welche sich aufgrund einer Querkzugbeanspruchung im Werkstoff, die durch das Strecken der umgelenkten Fasern während der Belastung in der harzreichen Zone verursacht wird, ausbilden. Bei Erreichen der Belastungsgrenze wachsen diese instabil in Längsrichtung durch die Probe und führen damit zu dem zuvor dargestellten Versagensverhalten der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten z-Pin-verstärkten Lamine.

Abbildung 4.39 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper in Abhängigkeit von der Pingeometrie. Die Ergebnisse der Untersuchungen unter schwingender Belastung zeigen, dass die Einbringung von z-Pins zu einer Verringerung der Lebensdauer führt. Die Lebensdauerkurven verpinnter FKV-Lamine liegen dabei über den gesamten Lastwechselbereich auf deutlich niedrigeren Spannungsniveaus. Die erzielten Ergebnisse entsprechen damit dem allgemein beschriebenen Ermüdungsverhalten mit kreisrunden z-Pins verstärkter FKV [39, 41].

Die in Abbildung 4.39 zusätzlich dargestellte Neigung  $m$  der Lebensdauerkurven der untersuchten Testreihen zeigt, dass die Einbringung von z-Pins dabei, im Vergleich zu un- verpinnten Laminaten, zu einer leichten Zunahme der Neigung und damit einer geringen Beschleunigung der Schädigungsausbreitung im Werkstoff führt. Aufgrund des starken Einflusses der z-Pins auf die Zugeigenschaften ist die Reduktion der Ermüdungsfestigkeit z-Pin-verstärkter Lamine dennoch in erster Linie auf die Abnahme der in den quasi- statischen Untersuchungen ermittelten Zugfestigkeit zurückzuführen. Folgerichtig konnte eine entsprechende Abnahme der Lebensdauer mit zunehmender Störbreite der Pins festgestellt werden. Unter Berücksichtigung der begrenzten Datenmenge scheint darüber hinaus die Pingeometrie bzw. die Ausrichtung der rechteckigen Pins im Werkstoff keinen signifikanten Einfluss auf die Neigung der Lebensdauerkurven auszuüben.

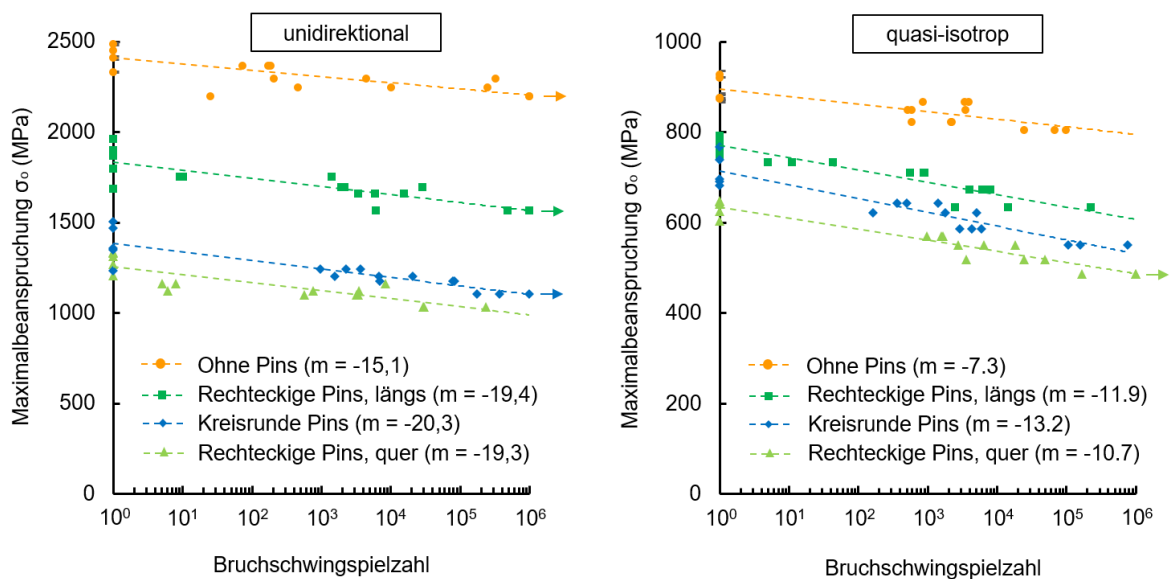


Abbildung 4.39: Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Zugbelastung in Abhängigkeit von der Pingeometrie

Die untersuchten Prüfkörper ohne z-Pin-Verstärkung zeigten lediglich geringe Ermüdungserscheinungen mit einer Dauerfestigkeit (ermittelt für  $10^6$  Lastwechsel) von 91 % (UD) bzw. 87 % (QI) ihrer jeweiligen Zugfestigkeit. Demgegenüber liegt die Dauerfestigkeit der z-Pin-verstärkten Prüfkörper etwas geringer. Diese beträgt für die geprüften unidirektionalen Lamine 80 % für kreisrunde Pins sowie 85 % und 79 % für längs bzw. quer ausgerichtete rechteckige z-Pins. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die quasi-isotropen Prüfkörper. Je nach Ausrichtung im Laminat liegt die Dauerfestigkeit für rechteckige z-Pins bei 79 % (längs) bzw. 77 % (quer) ihrer jeweiligen Zugfestigkeit. Die ermittelte Dauerfestigkeit von QI-Prüfkörpern mit kreisrunden z-Pins beträgt 74 %.

Die Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Proben vom Pingeinhalt ist in Abbildung 4.40 für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins dargestellt. Alle untersuchten Pingehalte führen dabei zu einer Verringerung der Ermüdungsfestigkeit gegenüber unverpinnten Proben. Da lediglich ein geringer Einfluss des Pingeinhalts auf die Neigung der Lebensdauerkurven festzustellen ist, nimmt die Ermüdungsfestigkeit dabei entsprechend der Ergebnisse der quasi-statischen Festigkeitsuntersuchungen mit zunehmenden Pingeinhalt sukzessive ab.

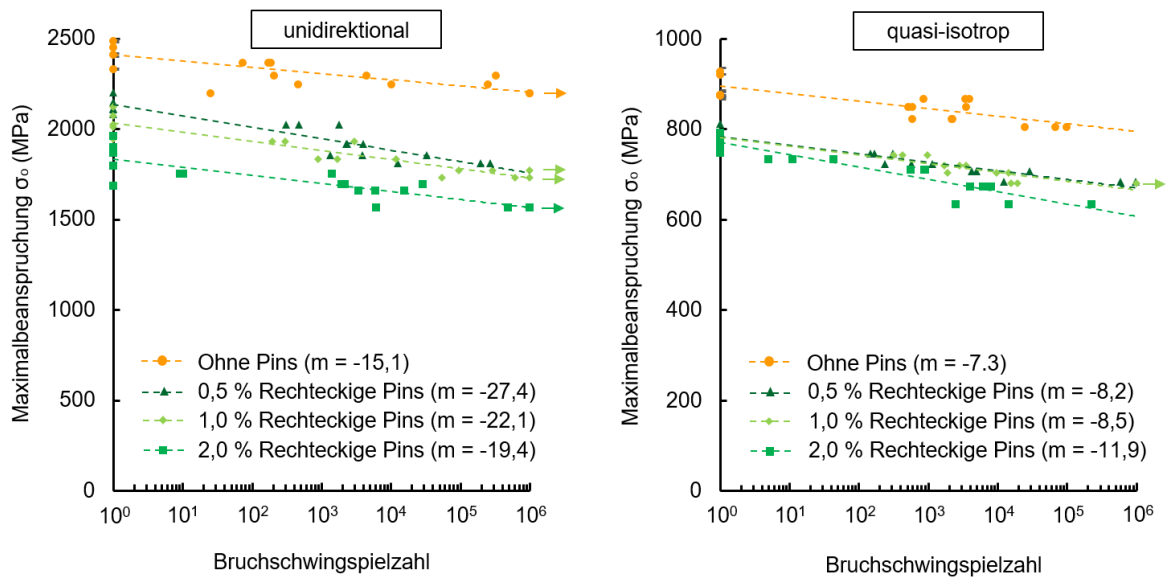


Abbildung 4.40: Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Zugbelastung in Abhängigkeit vom Pingeinhalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins

#### 4.3.5 Drucksteifigkeit und -festigkeit

Abbildung 4.41 zeigt den Einfluss einer z-Pin-Verstärkung auf die im Rahmen der quasi-statischen Druckversuche ermittelten Kraft-Weg-Verläufe anhand ausgewählter Prüfkörper. Für alle Testreihen ist dabei zunächst ein linearer Anstieg der gemessenen Kraft festzustellen, bis das Einsetzen erster Schädigungen im Werkstoff durch einen charakteristischen Knick in der Kurve angezeigt wird. Unter einachsiger Druckbelastung handelt es sich dabei in der Regel um das lokale Ausknicken von Verstärkungsfasern in den Bereichen des Werkstoff, in denen die Fasern nicht exakt in Lastrichtung vorliegen [105]. Nach Einsetzen dieser irreversiblen Werkstoffschädigung zeigen alle Prüfkörper bis zu ihrem Versagen einen zweiten linearen Anstieg der Kraft mit zunehmender Verschiebung, der jedoch gegenüber der ersten Phase des Kraft-Weg-Verlaufs durch eine geringere Steifigkeit

### 4.3 Experimentelle Untersuchungen

gekennzeichnet ist. Die Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe zeigt zudem, dass vor allem die Einbringung einer z-Pin-Verstärkung mit hohem Pingegehalt zu einer deutlichen Absenkung der Kraft, bei der die beschriebene Schädigung im Werkstoff einsetzt, führt.

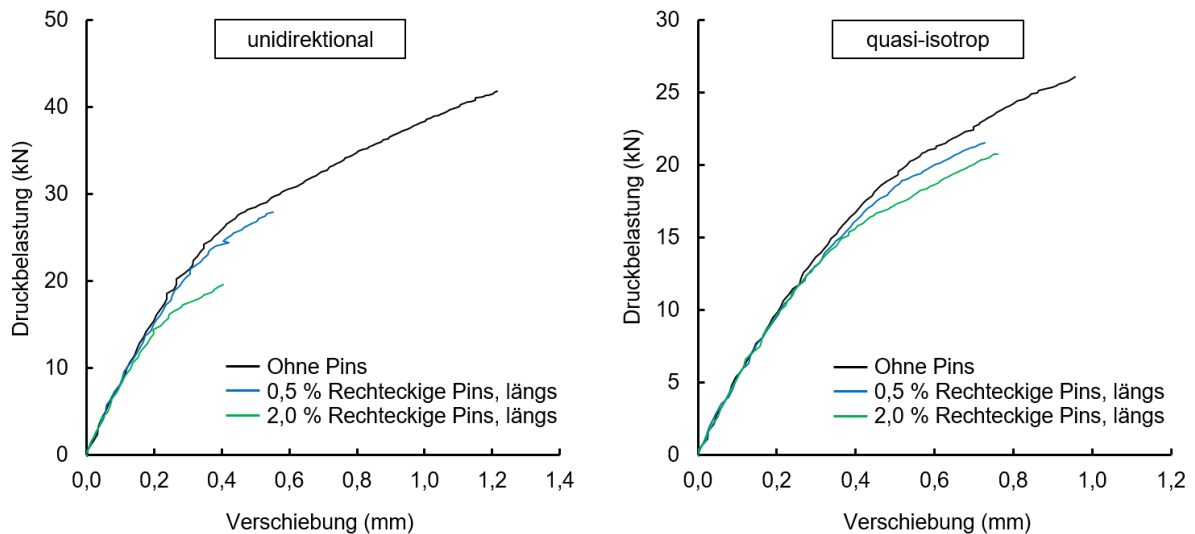


Abbildung 4.41: Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper unter Druckbelastung

Die Auswirkung der getesteten z-Pin-Verstärkungen auf die gemäß DIN EN ISO 14126 [101] ermittelten Drucksteifigkeiten unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper ist in Tabelle 4.5 dargestellt. Wie bereits durch die Kraft-Weg-Verläufe angedeutet, üben die eingebrachten z-Pins lediglich einen sehr geringen Einfluss auf den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Druck-E-Modul der Prüfkörper aus. Über alle Testreihen hinweg weicht die errechnete durchschnittliche Drucksteifigkeit dabei lediglich um wenige Prozentpunkte von den Werten der jeweiligen unverpinnten Prüfkörper ab. Unter Berücksichtigung der zum Teil starken Messwertschwankungen kann daher im Rahmen dieser Untersuchungen nicht von einem definitiven Zusammenhang zwischen der Prüfkörpersteifigkeit und der z-Pin-Verstärkung gesprochen werden. Die erzielten Resultate stehen demnach im Widerspruch zu den in vergleichbaren experimentellen Untersuchungen erzielten Ergebnissen [5, 78]. Mouritz [5] berichtet für kreisrunde z-Pins ( $\varnothing 0,51$  mm) von einer Degradation der Drucksteifigkeit von 17 % bzw. 12 % in unidirektionalen und quasi-isotropen Laminaten, welche hauptsächlich durch den reduzierten Faservolumengehalt und die Faserwelligkeit hervorgerufen wird. Da die in dieser Arbeit untersuchten Proben vergleichbare mikrostrukturelle Beeinflussungen aufwiesen, könnten die widersprüchlichen Ergebnisse auf unterschiedliche Methoden in der Berechnung des E-Moduls zurückzuführen sein. Eine Information über die verwendeten Berechnungsmethoden wird jedoch in keiner der genannten Publikationen gegeben.

Tabelle 4.5: Einfluss kreisrunder und rechteckiger z-Pins auf die Drucksteifigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Prüfkörper

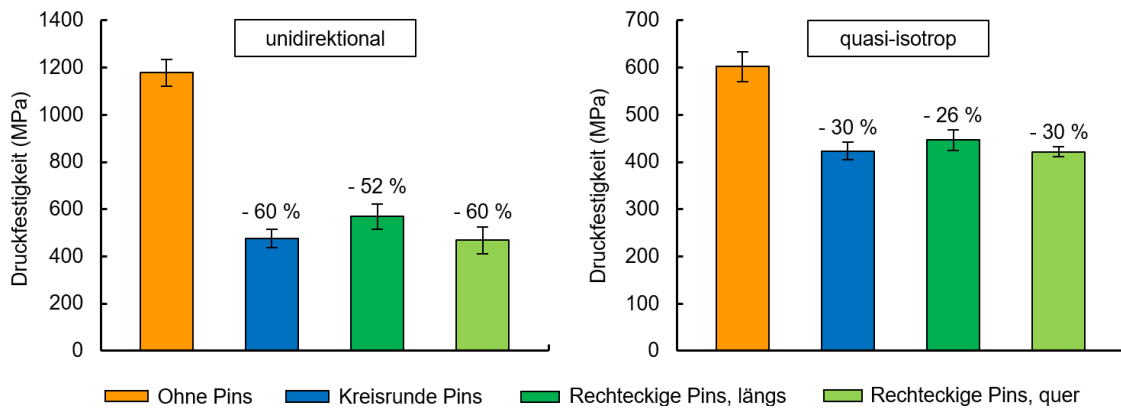
Aufbau	z-Pins	Ausrichtung	Pingehalt	E-Modul (GPa)	$\Delta E_D$
UD	-	-	0,0 %	$130,5 \pm 6,1$	-
UD	eckig	längs	0,5 %	$128,4 \pm 14,3$	-1,61 %
UD	eckig	längs	1,0 %	$138,7 \pm 3,3$	+6,28 %
UD	eckig	längs	2,0 %	$126,9 \pm 19,1$	-2,76 %
UD	eckig	quer	2,0 %	$127,0 \pm 9,7$	-2,68 %
UD	rund	-	2,0 %	$124,5 \pm 11,8$	-4,60 %
QI	-	-	0,0 %	$51,4 \pm 3,1$	-
QI	eckig	längs	0,5 %	$49,0 \pm 1,9$	-4,67 %
QI	eckig	längs	1,0 %	$56,3 \pm 9,5$	+9,53 %
QI	eckig	längs	2,0 %	$51,9 \pm 2,5$	+0,97 %
QI	eckig	quer	2,0 %	$49,7 \pm 2,8$	-3,31 %
QI	rund	-	2,0 %	$48,4 \pm 2,3$	-5,84 %

In Abbildung 4.42 sind die Druckfestigkeiten von unidirektionalen und quasi-isotropen unverpinnten Prüfkörpern mit den Ergebnissen für kreisrunde und rechteckige z-Pins mit einem Pingehalt von 2,0 % gegenübergestellt. Alle z-Pin-verstärkten Lamine weisen demnach eine starke Reduzierung der Druckfestigkeit gegenüber unverpinnten Prüfkörpern auf. Während die Degradation der Druckfestigkeit für längs ausgerichtete rechteckige Pins 52 % beträgt, führen kreisrunde und quer ausgerichtete rechteckige z-Pins jeweils zu einer Reduzierung um 60 %. Ähnlich der dargestellten Ergebnisse zur Zugfestigkeit weisen quasi-isotrope Lamine eine deutlich geringere Anfälligkeit gegenüber einer Einbringung von z-Pins auf. Einer Abnahme der Druckfestigkeit von 26 % für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins steht hier eine Degradation von 30 % im Zusammenhang mit quer ausgerichteten rechteckigen und kreisrunden z-Pins gegenüber. Aufgrund der vergleichsweise großen Faserwelligkeitswinkel übersteigt die Degradation der Festigkeitswerte, ähnlich wie in den Untersuchungen zur Zugfestigkeit, die Angaben aus vergleichbaren experimentellen Untersuchungen deutlich [5, 37, 40, 74]. Mouritz [5] berichtet für kreisrunde z-Pins mit einem Durchmesser von 0,28 mm und einem Pingehalt von 2,0 % von einer Abnahme der Druckfestigkeit je nach Laminataufbau von 14 % (UD) bzw. 11 % (QI).

In beiden Laminattypen weisen längs ausgerichtete rechteckige z-Pins die geringste Reduzierung der Druckfestigkeit auf. Als Hauptursache für die Degradation der Druckfestigkeit im Zusammenhang mit z-Pins wird in der wissenschaftlichen Literatur im Allgemeinen die Faserwelligkeit und die damit einhergehende Reduzierung der Knickspannung der Verstärkungsfasern in unmittelbarer Umgebung der Pins genannt [5, 37, 79]. Vor dem Hintergrund der Abhängigkeit der Faserwelligkeit von der Störbreite der Pins sind die erzielten Ergebnisse daher plausibel. Da Faserbrüche im Zusammenhang mit der Druckfestigkeit



eine untergeordnete Rolle spielen, führt die Drehung eines Teils der quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins während des Einbringprozesses, anders als für die Zugfestigkeit beobachtet und trotz der nominell größeren Störbreite der Pins, in UD-Laminaten zu identischen Ergebnissen wie kreisrunde z-Pins. Auch in den geprüften QI-Laminaten ist die Degradation der Druckfestigkeit von kreisrunden und quer ausgerichteten rechteckigen z-Pins identisch. Da in diesen keine Drehung der rechteckigen Pins stattfindet, können die identischen Druckfestigkeiten nicht darauf zurückgeführt werden. Die Druckfestigkeiten für unterschiedliche Pingeometrien und -ausrichtungen liegen in quasi-isotropen Laminaten, verglichen mit den Ergebnissen der UD-Prüfkörper, deutlich dichter beisammen. Ein möglicher Unterschied zwischen quer ausgerichteten rechteckigen und kreisrunden z-Pins könnte daher lediglich durch die Messunsicherheit überlagert worden sein.



Abbildungung 4.42: Abhängigkeit der Druckfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine von der Pingeometrie

Aufgrund der starken Anfälligkeit von FKV-Laminaten unter Druckbelastung gegenüber Winkelabweichungen der Verstärkungsfasern aus der Lastrichtung, fällt die Degradation verglichen mit den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen zur Zugfestigkeit noch einmal deutlich größer aus. Darüber hinaus sind die Unterschiede zwischen längs ausgerichteten rechteckigen und kreisrunden z-Pins, verglichen mit den Ergebnissen zur Zugfestigkeit, weniger deutlich ausgeprägt. Dies deutet darauf hin, dass bereits kleine Faserwelligkeitswinkel einen starken Einfluss auf die Druckfestigkeit der getesteten Prüfkörper ausüben, eine weitere Zunahme der Faserwelligkeit jedoch lediglich zu einer geringen weiteren Abnahme der Druckfestigkeit führt.

In Abbildung 4.43 ist der Einfluss des Pingehalts auf die Druckfestigkeit von unidirektionalen und quasi-isotropen FKV-Laminaten für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins dargestellt. Mit zunehmendem Pingealt sinkt der Abstand der z-Pins im Laminat zueinander, wodurch sich die in Abschnitt 2.5.5 beschriebenen Knickbänder leichter von Pin zu Pin im Werkstoff ausbreiten können [5]. In beiden Laminaten nimmt die Druck-

festigkeit daher folgerichtig mit zunehmendem Pingegehalt ab. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits bei einem Pingegehalt von 0,5 % eine signifikante Abnahme der Druckfestigkeit um 32 % (UD) bzw. 18 % (QI) zu verzeichnen ist. Anders als unter Zugbelastung besteht dabei kein linearer Zusammenhang zwischen der Festigkeitsreduktion und dem Pingegehalt. Stattdessen führt eine Zunahme des Pingegehalts, vor allem in QI-Laminaten, lediglich zu einer moderaten weiteren Degradation der Druckfestigkeit.

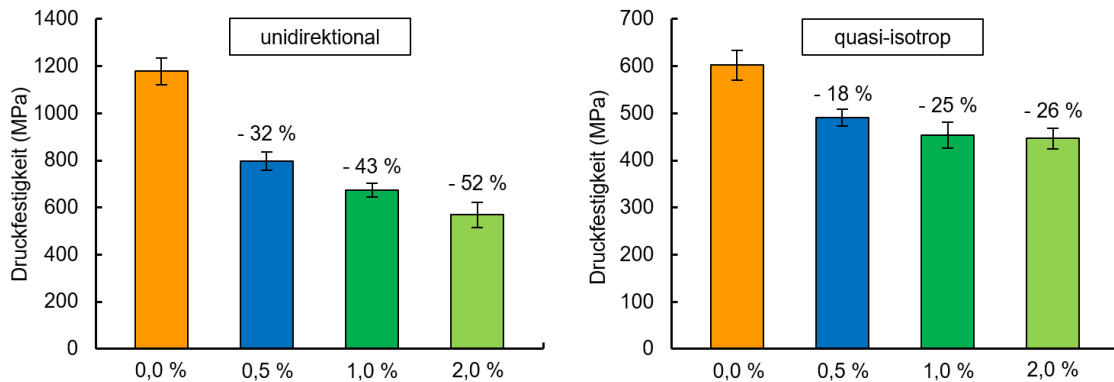


Abbildung 4.43: Abhängigkeit der Druckfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Laminat vom Pingegehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins

Das Bruchbild der versagten Druckprüfkörper wurde durch die z-Pin-Verstärkung nicht merklich beeinflusst. Alle Prüfkörper versagten bei Erreichen der Belastungsgrenze plötzlich und katastrophal. In Abbildung 4.44 ist das Versagensverhalten der Proben anhand von repräsentativen unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern dargestellt. Das Versagen der UD-Prüfkörper tritt durch einen vergleichsweise glatten Bruch der Fasern innerhalb der freien Einspannlänge der Probe ein. In den verpinnten UD-Laminaten verläuft die Bruchfläche dabei immer entlang der eingebrachten z-Pins, wobei sich diese entweder entlang einer Pinreihe ausbildet oder während ihres Wachstums durch die Probe auf eine benachbarte Pinreihe überspringt. Das Versagensverhalten der quasi-isotropen Prüfkörper ist hingegen, unabhängig von der Präsenz einer z-Pin-Verstärkung, durch einen komplexen Bruch und ein Aufsplintern der Faserlagen des Verbundwerkstoffs gekennzeichnet.

In Abbildung 4.45 sind die Lebensdauerkurven für unidirektionale und quasi-isotrope Laminat in Abhängigkeit von der Pingeometrie dargestellt. Im Vergleich zu den Ermüdungsversuchen unter Zugbelastung wurden im Rahmen der Druckversuche dabei deutlich stärkere Schwankungen in den Bruchschwingungszahlen von Prüfkörpern, welche auf einem identischen Beanspruchungsniveau geprüft wurden, festgestellt. Dennoch konnte auch unter Druckbelastung ein log-lineares Verhalten der Lebensdauerkurven über den gesamten Lastwechselbereich ermittelt werden. Die Dauerfestigkeit der unverpinnten Prüfkörper liegt dabei je nach Aufbau bei 81 % (UD) bzw. 72 % (QI) ihrer jeweiligen Druckfestigkeit.

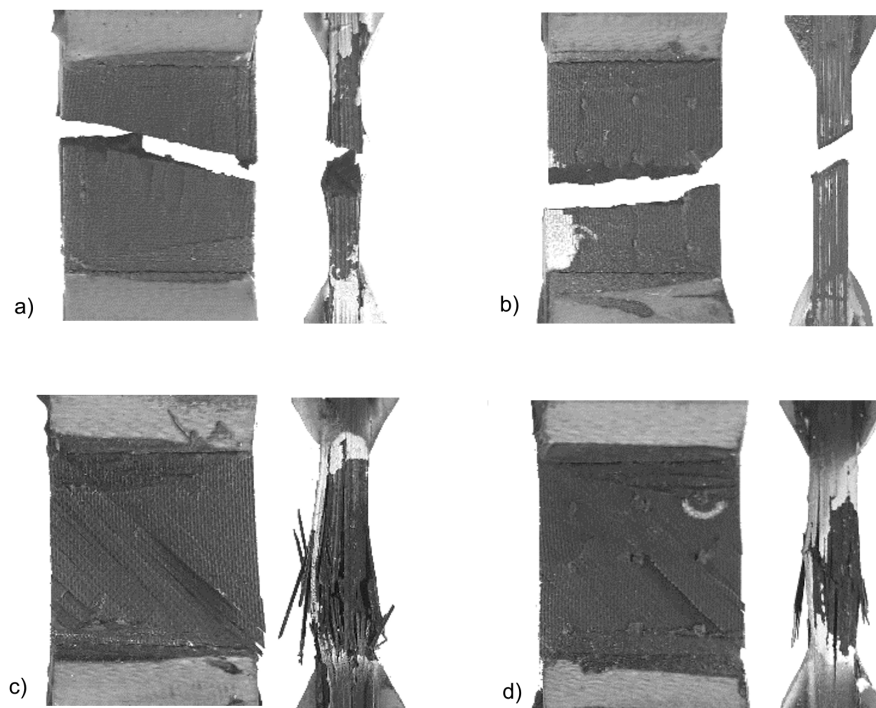


Abbildung 4.44: Versagen unidirektionaler Lamine (a) ohne z-Pin-Verstärkung und (b) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins sowie quasi-isotroper Lamine (c) ohne z-Pin-Verstärkung und (d) mit längs ausgerichteten rechteckigen z-Pins unter quasi-statischer Druckbelastung

Analog der Zugversuche führt die Einbringung von z-Pins in den Werkstoff zu einer deutlichen Abnahme der Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Störbreite der Pins. Im Unterschied zu den Ergebnissen der Versuche unter Zugbelastung führt das Einbringen von z-Pins zusätzlich zu einer Reduzierung der Neigung der Lebensdauerkurven. Vor allem in quasi-isotropen Laminaten führt diese zu einer starken Annäherung der Lebensdauerkurven unverpinnter und z-Pin-verstärkter Lamine in Bereichen hoher Lastwechselzahlen. Aufgrund der deutlich stärkeren Degradation der Druckfestigkeit liegen die Ermüdungsfestigkeiten z-Pin-verstärkter unidirektionaler Lamine hingegen über den gesamten Lastwechselzahlbereich deutlich unterhalb der für unverpinnte Lamine. Die geringere Neigung der Lebensdauerkurven z-Pin-verstärkter Lamine führt, gegenüber unverpinnten Proben, zu einem geringeren prozentualen Verlust der Festigkeit nach  $10^6$  Lastwechseln. Die ermittelte Dauerfestigkeit in unidirektionalen FKV beträgt für rechteckige Pins je nach Ausrichtung im Laminat 85 % (längs) bzw. 82 % (quer). Die Dauerfestigkeit für kreisrunde z-Pins liegt in diesen Laminaten sogar bei 91 %. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die getesteten quasi-isotropen Proben. Die Dauerfestigkeit der z-Pin-verstärkten Lamine liegt hier bei 92 % für kreisrunde sowie 92 % und 83 % für längs bzw. quer ausgerichtete rechteckige z-Pins.

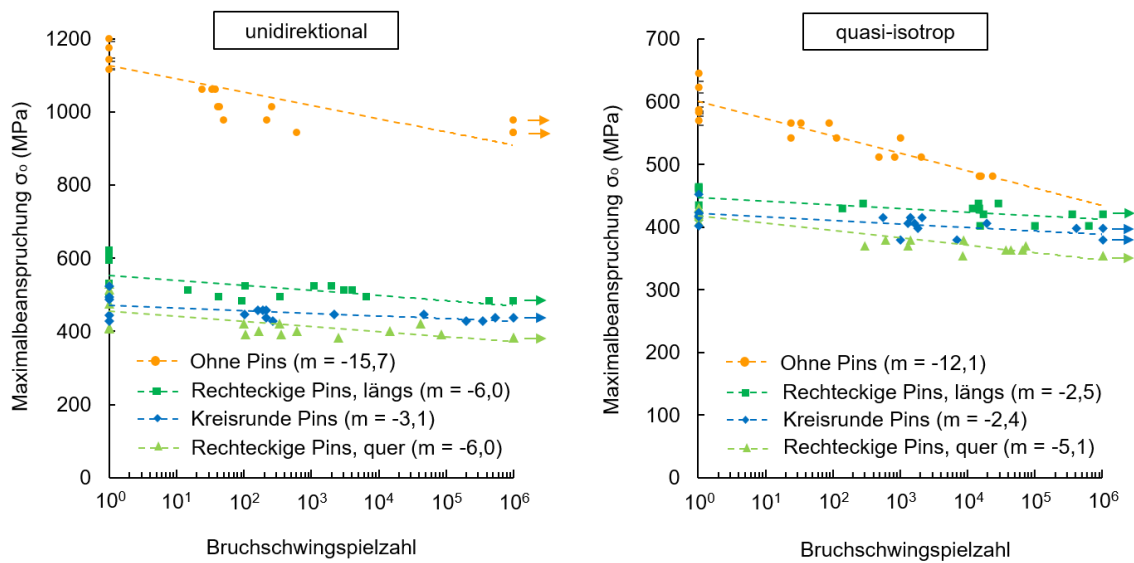


Abbildung 4.45: Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Druckbelastung in Abhängigkeit von der Pin-Geometrie

In Abbildung 4.46 ist zusätzlich die Abhängigkeit der ermittelten Lebensdauerkurven vom Pin-gehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins in unidirektionalen und quasi-isotropen Prüfkörpern dargestellt. Ein signifikanter Einfluss des Pin-gehalts auf die Neigung der Lebensdauerkurven z-Pin-verstärkter Lamine ist dabei nicht zu erkennen. Entsprechend der ermittelten Druckfestigkeit nimmt daher auch die Ermüdungsfestigkeit mit zunehmendem Pin-gehalt ab.

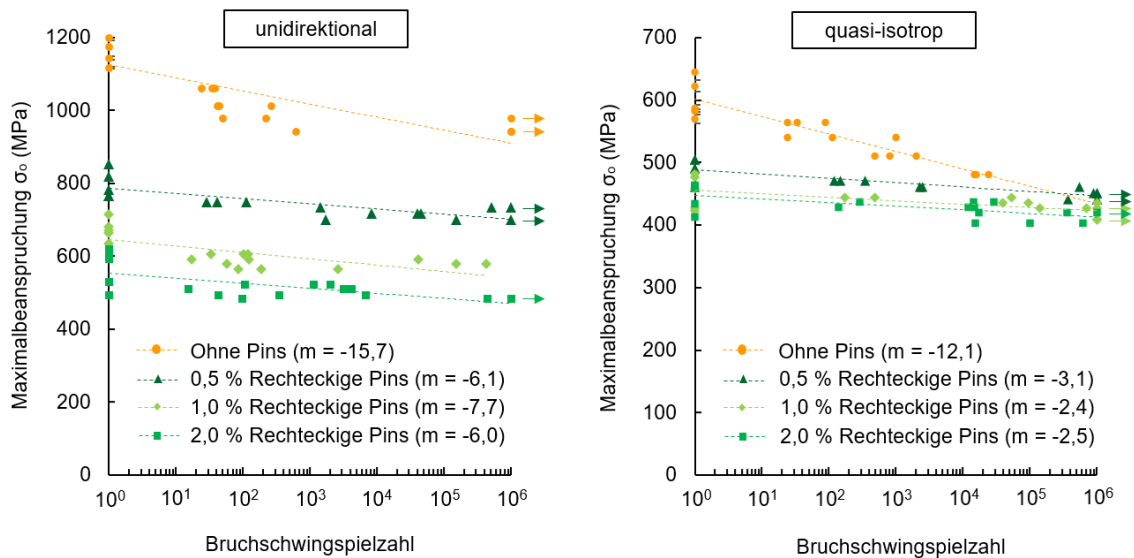


Abbildung 4.46: Lebensdauerkurven unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine unter Druckbelastung in Abhängigkeit vom Pin-gehalt für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Klassische Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich im Allgemeinen durch hervorragende gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften in der Laminebene aus. Aufgrund ihres charakteristischen schichtweisen Aufbaus und dem daraus resultierenden Fehlen von Verstärkungsfasern in Dickenrichtung des Werkstoffs sind diese jedoch anfällig für die Bildung von Rissen zwischen den Faserlagen, beispielsweise als Folge von stoßartigen Belastungen oder interlaminaren Scherbeanspruchungen. Das Einbringen von z-Pins in den Werkstoff stellt dabei eine bewährte Methode dar die Ausbreitung von interlaminaren Rissen zu behindern und auf diese Weise die geforderte Resttragfähigkeit eines FKV-Bauteils sicherzustellen. Durch die Übertragung von Brückenkräften zwischen den Flanken eines entstandenen Risses sind z-Pins in der Lage die interlaminare Risszähigkeit und die Schadenstoleranz von Faserverbundwerkstoffen zu erhöhen. Die beim Einbringen von z-Pins hervorgerufene Beeinflussung der Mikrostruktur des Werkstoffs führt hingegen zusätzlich zu einer spürbaren Degradation der mechanischen Eigenschaften in der Laminebene, so dass bei der Auslegung z-Pin-verstärkter Lamine ein gewisser Zielkonflikt entsteht. Ein vielversprechender Ansatz diesen aufzulösen ist dabei die Veränderung der Querschnittsgeometrie der verwendeten z-Pins. Rechteckige z-Pins stellen bei gleicher Querschnittsfläche gegenüber kreisrunden z-Pins eine größere Oberfläche zur Übertragung von Brückenkräften im Werkstoff zur Verfügung. Bei entsprechender Orientierung der rechteckigen z-Pins im Laminat wird zudem, aufgrund der geringeren Störbreite, die Mikrostruktur des Laminats weniger stark beeinflusst.

Ziel dieser Arbeit war daher die Untersuchung des Einflusses rechteckiger z-Pins auf die Mikrostruktur sowie die mechanischen Eigenschaften heißaushärtender CFK-Lamine unter quasi-statischer und schwingender Belastung und die Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit denen kreisrunder z-Pins. Zu diesem Zweck wurde zunächst der Einfluss der Pin-geometrie auf die mikrostrukturellen Eigenschaften z-Pin-verstärkter FKV-Lamine untersucht. Im Vordergrund stand dabei die Ermittlung des Einflusses der Pin-geometrie auf den Zustand der Pin-Laminat-Grenzfläche, die Schrägstellung der Pins im Laminat sowie die Umlenkungen und Brüche der Verstärkungsfasern des Grundwerkstoffs.

Anhand von Pullout-Versuchen sollte gezeigt werden, wie sich potentielle Unterschiede im Grenzflächenzustand auf die erzielbaren Brückenkräfte kreisrunder und rechteckiger z-Pins auswirken. In bruchmechanischen Versuchen unter Mode-I- und Mode-II-Beanspruchung wurde zudem der Einfluss der Pingeometrie auf die Risszähigkeit sowie das Risswachstumsverhalten unter schwingender Beanspruchung ermittelt. Zusätzlich wurde die Auswirkung einer veränderten Pingeometrie auf die in-plane-Eigenschaften z-Pin-verstärkter Lamine untersucht. Das Ziel war dabei zu evaluieren wie sich die geänderte Mikrostruktur auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sowie das Ermüdungsverhalten unter Zug- und Druckbelastung auswirken.

Die durchgeführten Pullout-Versuche haben gezeigt, dass die Verwendung von rechteckigen z-Pins sowohl in unidirektionalen als auch in quasi-isotropen Prüfkörpern zu einer deutlichen Steigerung der im Werkstoff erzeugten Brückenkräfte führt. In unidirektionalen Laminaten konnte sowohl in Verbindung mit längs als auch quer zur Faserrichtung ausgerichteten rechteckigen z-Pins eine deutliche Erhöhung der Brückenkräfte gegenüber kreisrunden z-Pins erzielt werden. Da die erzielte Steigerung in quasi-isotropen Laminaten wesentlich stärker ausfiel, konnte zudem eine spürbare Abhängigkeit der Unterschiede im Pulloutverhalten kreisrunder und rechteckiger z-Pins vom Laminataufbau festgestellt werden. Neben der vergrößerten Pinoberfläche ist vor allem das unterschiedliche Ablöseverhalten kreisrunder und rechteckiger z-Pins während der Abkühlung von der Heißaushärtung für die erhöhten Brückenkräfte während des Pullout-Versuchs verantwortlich. Sowohl die Mikrostrukturuntersuchungen als auch die numerische Simulation des Abkühlvorgangs vom Autoklavprozess haben gezeigt, dass die geänderte Pingeometrie zu einer signifikanten Reduzierung des Anteils der geschädigten Grenzfläche an der gesamten Pinoberfläche führt. Aufgrund der gegenüber kreisrunden z-Pins erhöhten Brückenkräfte konnte zudem die Energiemenge, die während des Pinauszugs dissipiert wird, unter Verwendung von rechteckigen z-Pins erhöht werden.

Die Untersuchung des Einflusses der Pingeometrie auf die interlaminare Risszähigkeit unter Mode-I-Beanspruchung fand im DCB-Verfahren statt. Zwar konnte durch die Ausbildung einer Brückenzone im Laminat für beide Pingeometrien eine Vervielfachung der kritischen Energiefreisetzungsrate gegenüber unverpinnten Prüfkörpern erzielt werden, die Unterschiede in den Brückenkräften zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins führten jedoch in beiden Laminataufbauten zu einer erhöhten Risszähigkeit in Verbindung mit rechteckigen Pins. Dabei zeigten die Ergebnisse der Versuche, dass die Ausrichtung der rechteckigen Pins lediglich einen untergeordneten Einfluss auf die erzielte Risszähigkeit ausübt. Aufgrund der im Pullout-Versuch nachgewiesenen deutlicheren Steigerung der Brückenkräfte fiel der Unterschied zwischen beiden Pingeometrien auch im DCB-

Versuch in quasi-isotropen Laminaten spürbar größer aus. Während unter quasi-statischer Mode-I-Beanspruchung in beiden Laminataufbauten ein signifikanter Einfluss der Pingeometrie auf die erzielten Ergebnisse ermittelt wurde, konnte unter schwingender Mode-I-Beanspruchung lediglich in quasi-isotropen Laminaten eine Reduzierung der Rissfortschrittsgeschwindigkeit durch die Verwendung rechteckiger z-Pins gegenüber kreisrunden Pins erzielt werden. Während der schwingenden Beanspruchung auftretende Verschleiß- und Abriebeffekte zwischen den Pins und dem Laminat sorgten dabei mit zunehmender Lastwechselzahl für eine Annäherung der durch die kreisrunden und rechteckigen z-Pins übertragenen Brückenkräfte, sodass die Unterschiede im Rissfortschrittsverhalten im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuche unter quasi-statischer Beanspruchung spürbar geringer ausfielen.

Aufgrund des instabilen Risswachstums in den getesteten unidirektionalen Prüfkörpern konnte der Einfluss der z-Pin-Geometrie auf die im ENF-Verfahren ermittelte interlaminare Risszähigkeit unter Mode-II-Beanspruchung im Rahmen dieser Arbeit lediglich für quasi-isotrope Lamine untersucht werden. In diesen führte die Einbringung rechteckiger z-Pins zu einer spürbaren, wenngleich gegenüber den Ergebnissen der Versuche unter Mode-I-Beanspruchung etwas moderateren Steigerung der kritischen Energiefreisetzungsrate im Vergleich zu unverpinnten Prüfkörpern. Da das Versagensverhalten der z-Pins durch einen vergleichsweise glatten Scherbruch der Pins in der Rissebene geprägt und der Widerstand gegen das Ausbreiten von interlaminaren Rissen damit lediglich von der Querschnittsfläche der verwendeten z-Pins abhängig war, konnte kein Einfluss der Pingeometrie auf die kritische Energiefreisetzungsrate unter Mode-II-Beanspruchung festgestellt werden. Unter schwingender Beanspruchung führte die Einbringung rechteckiger z-Pins erst für hohe Beanspruchungsamplituden zu einer spürbaren Verringerung der Rissfortschrittsgeschwindigkeit gegenüber unverpinnten Laminaten. Ein Einfluss der Pingeometrie bzw. der Ausrichtung rechteckiger z-Pins auf die Ermüdungseigenschaften konnte nicht festgestellt werden.

Die bei der Einbringung der getesteten z-Pins entstehenden Faserumlenkungen und -brüche führten zu einer Reduzierung der mechanischen in-plane-Eigenschaften z-Pin-verstärkter Lamine. Die Mikrostrukturuntersuchungen haben gezeigt, dass die resultierenden Faserwelligkeitswinkel im Werkstoff linear mit der Störbreite der verwendeten z-Pins zunehmen. Entsprechend führte sowohl die Verwendung kreisrunder als auch rechteckiger z-Pins zu einer spürbaren Abnahme der Zugsteifigkeit gegenüber unverpinnten Proben. Die geringere Störbreite längs ausgerichteter rechteckiger z-Pins führte dabei folgerichtig zu einer deutlich geringeren Reduzierung des E-Moduls gegenüber kreisrunden z-Pins. Die Einbringung rechteckiger z-Pins quer zur Belastungsrichtung resultierte hinge-

gen in einer stärkeren Degradation der Zugsteifigkeit in quasi-isotropen Laminaten bzw. durch die Drehung einiger rechteckiger z-Pins zu einer gegenüber kreisrunden Pins vergleichbaren Steifigkeitsabnahme in unidirektionalen Prüfkörpern. Im Zusammenhang mit der Zugfestigkeit konnte hingegen für beide Laminataufbauten eine stetige Degradation mit zunehmender Störbreite der z-Pins beobachtet werden. Da kein Einfluss der Pingeometrie auf die Schädigungsausbreitung im Werkstoff festgestellt wurde, konnte sowohl in unidirektionalen als auch in quasi-isotropen Laminaten eine Abnahme der Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Störbreite der z-Pins zu verzeichnet werden.

Trotz der nachgewiesenen Beeinflussung der Mikrostruktur konnte ein Einfluss von kreisrunden und rechteckigen z-Pins auf die Drucksteifigkeit der getesteten Prüfkörper nicht zweifelsfrei festgestellt werden. Die Druckfestigkeit unidirektionaler und quasi-isotroper Lamine zeigte hingegen für beide Pingeometrien eine starke Degradation in Verbindung mit der Einbringung von z-Pins. Analog der Erkenntnisse zur Zugfestigkeit konnte dabei eine Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Störbreite der verwendeten Pins festgestellt werden. Aufgrund ihrer geringeren Störbreite wurde für längs ausgerichtete rechteckige z-Pins in beiden untersuchten Laminataufbauten daher die geringste Abnahme der Druckfestigkeit verzeichnet. Eine vergleichbare Abhängigkeit von der Pingeometrie konnte auch für die Ermüdungsfestigkeit z-Pin-verstärkter Lamine unter schwingender Druckbeanspruchung festgestellt werden.

Die positiven Auswirkungen von z-Pins auf die interlaminare Risszähigkeit von FKV-Werkstoffen sind in den letzten Jahren durch zahlreiche Untersuchungen bestätigt worden. Dennoch sind bis heute mit wenigen Ausnahmen keine nennenswerten Anwendungsfälle von z-Pin-Verstärkungen in der Industrie bekannt. Neben der mangelnden Wirtschaftlichkeit durch das Fehlen eines kostengünstigen und automatisierbaren Einbringverfahrens sind heute vor allem die Bedenken hinsichtlich der Degradation der mechanischen in-plane-Eigenschaften z-Pin-verstärkter FKV-Bauteile das entscheidende Hemmnis, welches der Erschließung neuer Anwendungsfelder entgegen steht. Die Ergebnisse dieser Arbeit konnten das Potential rechteckiger z-Pins, das Verhältnis der vorteilhaften zu den nachteiligen Auswirkungen einer z-Pin-Verstärkung positiv zu verändern, aufzeigen. Eine kritische Auseinandersetzung mit den erzielten Ergebnissen zeigt jedoch, dass der Einsatz rechteckiger z-Pins gegenüber kreisrunden Pins nicht in allen untersuchten Beanspruchungszuständen zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften führt. Für Beanspruchungen in der Laminebene liegt zudem eine starke Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Ausrichtung der rechteckigen z-Pins im Laminat vor. Der Einsatz rechteckiger z-Pins ist daher vor allem dann empfehlenswert, wenn die Hauptbelastungsrichtung der zu verstärkenden Struktur bekannt ist und die rechteckigen z-Pins entsprechend im Laminat



ausgerichtet werden können. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels der Unterschiede zwischen kreisrunden und rechteckigen z-Pins aus Beanspruchungszustand, Laminataufbau und Pingeometrie ist die Sinnhaftigkeit eines Einsatzes rechteckiger z-Pins jedoch für jeden Einzelfall genau zu prüfen.

In Verbindung mit heißaushärtenden FKV-Laminaten waren die wissenschaftlichen Untersuchungen bisher auf die Verwendung kreisrunder z-Pins beschränkt. Mit der vorliegenden Arbeit ist es erstmals gelungen die wichtigsten mechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter Lamine mit kreisrunden und rechteckigen z-Pins gegenüberzustellen und die Mechanismen, die für die unterschiedliche Leistungsfähigkeit beider Pingeometrien verantwortlich sind, zu identifizieren. Die Ergebnisse dieser Arbeit könnten daher neue Impulse für die zukünftige Forschungsarbeit liefern und auf das Potential alternativer Pingeometrien aufmerksam machen. Weiterführende Untersuchungen könnten sich daher mit der Ermittlung des Einflusses des Höhen/Breiten-Verhältnisses rechteckiger z-Pins auf die mechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter FKV beschäftigen. Aufgrund der beschriebenen Abhängigkeit des Grenzflächenzustands zwischen z-Pin und Laminat von der Pingeometrie wäre darüber hinaus die Untersuchung linsenförmiger, an den Faser-verlauf angepasster Pingeometrien vorstellbar, um die Entstehung von harzreichen Zonen im Laminat gänzlich zu unterdrücken und so die während der Abkühlung entstehenden Grenzflächenschädigungen zu minimieren.

# Literaturverzeichnis

- [1] SPAETH, A. ; BARTSCH, W.: *Das schwarze Gold von der Niederelbe*. URL:<https://magazin.lufthansa.com/xx/de/nonstop-you-mehr-als-nur-ein-guter-flug/das-schwarze-gold-a350/>, Zugriff am 30.05.2018
- [2] PINGKARAWAT, K. ; MOURITZ, A. P.: Improving the mode I delamination fatigue resistance of composites using z-pins. In: *Composites Science and Technology* 92 (2014), S. 70–76
- [3] MOURITZ, A. P.: Review of z-pinned composite laminates. In: *Composites Part A* 38 (2007), S. 2383–2397
- [4] CHANG, P. ; MOURITZ, A. P. ; COX, B. N.: Flexural properties of z-pinned laminates. In: *Composites Part A* 38 (2007), S. 244–251
- [5] MOURITZ, A. P.: Compression properties of z-pinned composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), S. 3110–3120
- [6] CHANG, P.: *The mechanical properties and failure mechanisms of z-pinned composites*, RMIT University, Diss., 2006
- [7] FREITAS, G. ; MAGEE, C. ; DARDZINSKI, P. ; FUSCO, T.: Fibre insertion process for improved damage tolerance in aircraft laminates. In: *Journal of Advanced Materials* 25 (1994), S. 36–43
- [8] CARTIÉ, D. D. R.: *Effect of z-fibres on the delamination behaviour of carbon fibre / epoxy laminates*, Cranfield University, Diss., 2000
- [9] PEGORIN, F. ; PINGKARAWAT, K. ; DAYNES, S. ; MOURITZ, A. P.: Mode II interlaminar fatigue performance of z-pinned carbon fiber reinforced epoxy composites. In: *Composites Part A* 67 (2014), S. 8–15

- [10] SWEETING, R. D. ; THOMSON, R. S.: The effect of thermal mismatch on z-pinned laminated composite structures. In: *Composite Structures* 66 (2004), S. 189–195
- [11] ZHANG, B. ; ALLEGRI, G. ; YASAEI, M. ; HALLETT, S. R.: Micro-mechanical finite element analysis of z-pins under mixed-mode loading. In: *Composites Part A* 78 (2015), S. 424–435
- [12] ZHANG, B. ; ALLEGRI, G. ; HALLETT, S. R.: Micro-mechanical finite element analysis of single z-pin pull-out. In: *2013 UK SIMULIA User Meeting*. Crewe, England, 2013
- [13] FANG, T. ; JUNQIAN, Z.: Numerical simulation of the residual stresses in z-pin unidirectional composites during curing process. In: *Boletín Técnico* 55 (2017), S. 35–42
- [14] KNAUPP, M.: *Einfluss rechteckiger z-Pins auf die mechanischen Eigenschaften translaminar verstärkter Verbundwerkstoffe mit Kohlenstofffaserverstärkung*, Universität Rostock, Diss., 2014
- [15] KNAUPP, M. ; SCHARR, G.: Manufacturing process and performance of dry carbon fabrics reinforced with rectangular and circular z-pins. In: *Journal of Composite Materials* 48 (2014), S. 2163–2172
- [16] KNAUPP, M. ; BAUDACH, F. ; FRANCK, J. ; SCHARR, G.: Mode I and pull-out tests of composite laminates reinforced with rectangular z-pins. In: *Journal of Composite Materials* 48 (2014), S. 2925–2932
- [17] LANDER, J. K.: *Designing with z-pins: locally reinforced composite structures*, Cranfield University, Diss., 2008
- [18] HALLAL, A. ; YOUNES, R. ; FARDOUN, F.: Review and comparative study of analytical modeling for the elastic properties of textile composites. In: *Composites Part B* 50 (2013), S. 22–31
- [19] WANG, C. ; ROY, A. ; SILBERSCHMIDT, V. V. ; CHEN, Z.: Modelling of damage evolution in braided composites: Recent developments. In: *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes* 3:15 (2017)

- [20] AVIATION SAFETY BUREAU: *Airframe Handbook – Volume 1*.  
URL:<http://content.aviation-safety-bureau.com/allmembers/faa-h-8083-31-amt-airframe-vol-1/sections/chapter7.php>, Zugriff am 08.09.2018
- [21] DRANSFIELD, K. A. ; BAILLE, C. ; MAI, Y.-W.: Improving the delamination resistance of CFRP by stitching - A review. In: *Composites Science and Technology* 50 (1994), S. 305–317
- [22] FUSCO, T. M. ; MAGEE, C. ; FREITAS, G.: *Method and system for inserting reinforcing elements in a composite structure*. US-Patent 5,589,015, Foster-Miller Inc., USA, 1996
- [23] AVILA, S. J.: *Method for inserting z-pins*. US-Patent 5,919,413, Boeing Company, USA, 1999
- [24] CHOI, I. H. ; AHN, S. M. ; YEOM, C. H. ; HWANG, I. H. ; LEE, D. S.: Manufacturing of z-pinned composite laminates. In: *17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, Schottland, 2009
- [25] LEFÈBURE, P.: Assembly of dry carbon preforms by a z-pinning technology. In: *SAMPE Europe Technical Conference*. Toulouse, Frankreich, 2006
- [26] VAIDYA, U. K. ; DUNCAN, B. ; KOPACZ, J.: Affordable processing and characterization of multi-functional z-pin reinforced VARTM composites. In: *13th International Conference on Composite Materials*. Peking, China, 2001
- [27] HOFFMANN, J. ; BRAST, A. ; SCHARR, G.: Z-pin insertion method for through-thickness reinforced thermoplastic composites. In: *Journal of Composite Materials* (2018). – <https://doi.org/10.1177/0021998318781233>
- [28] SONG, Q. ; LI, Y. ; QI, J. ; WEN, L. ; JUN, X. ; NI, J.: Study on an automatic multi pin insertion system for preparing z-pin composite laminates. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 27 (2014), S. 413–419
- [29] HALL, T. F. W. ; HILL, B. J. ; DELEON, W. R. ; MARINO, B. E. M.: *Automated z-pin insertion technique using universal insertion parameters*. US-Patent 7,409,757 B2, Northrop Grumman Corporation, USA, 2008

- [30] BOYCE, J. S. ; WALLIS, R. R. ; BULLOCK, D. E.: *Composite structure reinforcement*. US-Patent 4,808,461, Foster-Miller Inc., USA, 1989
- [31] RICHARD, H. A. ; SANDER, M.: *Ermüdungsrisse - Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 1. Auflage, 2009
- [32] ZHANG, A.-Y. ; LIU, H.-Y. ; MOURITZ, A. P. ; MAI, Y.-W.: Experimental study and computer simulation on degradation of z-pin reinforcement under cyclic fatigue. In: *Composites Part A* 39 (2008), S. 406–414
- [33] MOURITZ, A. P. ; KOH, T. M.: Re-evaluation of mode I bridging traction modelling for z-pinned laminates based on experimental analysis. In: *Composites Part B* 56 (2014), S. 797–807
- [34] DAI, S.-C. ; YAN, W. ; LIU, H.-Y. ; MAI, Y.-W.: Experimental study on z-pin bridging law by pullout test. In: *Composites Science and Technology* 64 (2004), S. 2451–2457
- [35] PINGKARAWAT, K. ; MOURITZ, A. P.: Comparative study of metal and composite z-pins for delamination fracture and fatigue strengthening of composites. In: *Engineering Fracture Mechanics* 154 (2016), S. 180–190
- [36] YASAEI, M. ; LANDER, J. K. ; ALLEGRI, G. ; HALLETT, S. R.: Experimental characterisation of mixed mode traction-displacement relationships for a single carbon composite z-pin. In: *Composites Science and Technology* 94 (2014), S. 123–131
- [37] STEEVES, C. A. ; FLECK, N. A.: In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement. In: *International Journal of Solids and Structures* 43 (2006), S. 3197–3212
- [38] KO, M.-G. ; KWEON, J.-H. ; CHOI, J.-H.: Fatigue characteristics of jagged pin-reinforced composite single-lap joints in hygrothermal environments. In: *Composite Structures* 119 (2015), S. 59–66
- [39] MOURITZ, A. P. ; CHANG, P.: Tension fatigue of fibre-dominated and matrix-dominated laminates reinforced with z-pins. In: *International Journal of Fatigue* 32 (2010), S. 650–658

- [40] MOURITZ, A. P. ; CHANG, P. ; COX, B. N.: Fatigue properties of z-pinned aircraft composite materials. In: *25th International Congress of the Aeronautical Sciences*. Hamburg, Deutschland, 2006
- [41] CHANG, P. ; MOURITZ, A. P. ; COX, B. N.: Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension. In: *Composites Part A* 37 (2006), S. 1501–1513
- [42] HUANG, H. ; WAAS, A. M.: Compressive response of z-pinned woven glass fiber textile composite laminates: Experiments. In: *Composites Science and Technology* 69 (2009), S. 2331–2337
- [43] LI, C. ; WU, Z. ; MENG, Z. ; LI, M.: Influential factors of z-pin bridging force. In: *Applied Composite Materials* 21 (2014), S. 615–631
- [44] CARTIÉ, D. D. R. ; COX, B. N. ; FLECK, N. A.: Mechanisms of crack bridging by composite and metallic rods. In: *Composites Part A* 35 (2004), S. 1325–1336
- [45] VAZQUEZ, J. T. ; CASTANIÉ, B. ; BARRAU, J.-J. ; SWIERGIEL, N.: Multi-level analysis of low cost z-pinned composite joints - Part 1: Single z-pin behaviour. In: *Composites Part A* 42 (2011), S. 2070–2081
- [46] REN, H. ; MENG, X.: Preparation of z-pin from different resin and evaluation of interlaminar reinforcement effect by pullout test. In: *Advanced Materials Research* 486 (2012), S. 444–448
- [47] KNOPP, A.: *Beitrag zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften z-Pin-verstärkter Faser-Kunststoff-Verbunde*, Universität Rostock, Diss., 2015
- [48] KNOPP, A. ; SCHARR, G.: Effect of surface treatment on delamination and debonding properties of z-pinned composite laminates. In: *Journal of Materials Science* 49 (2014), S. 1674–1683
- [49] ZHENG, X. ; GOU, L. ; HAN, S. ; YANG, F.: Experimental and numerical study on the mode I delamination toughness of z-pinned composite laminates. In: *Key Engineering Materials* 417–418 (2010), S. 185–188

- [50] KNOPP, A. ; SCHARR, G.: X-ray photo-electron spectroscopic studies of cryogenic and plasma surface-treated z-pins. In: *Journal of Composite Materials* 51 (2017), S. 1155–1166
- [51] WANG, X.-X. ; CHEN, L. ; JIAO, Y.-N. ; LI, J.-L.: Preparation of carbon fiber powder-coated z-pins and experimental study on the mode I delamination toughening properties. In: *Polymer Composites* 37 (2016), S. 3508–3515
- [52] WANG, X.-X. ; CHEN, L. ; JIAO, Y.-N.: Experimental study on interfacial adhesive properties between twisted z-pin and laminates. In: *Journal of Solid Rocket Technology* 37 (2014), S. 856–862
- [53] HOFFMANN, J. ; SABBAN, J. ; SCHARR, G.: Pullout performance of circumferentially notched z-pins in carbon fiber reinforced laminates. In: *Composites Part A* 110 (2018), S. 197–202
- [54] CARTIÉ, D. D. R. ; LAFFAILLE, J.-M. ; PARTRIDGE, I. K. ; BRUNNER, A. J.: Fatigue delamination behaviour of unidirectional carbon fibre/epoxy laminates reinforced by z-Fiber pinning. In: *Engineering Fracture Mechanics* 76 (2009), S. 2834–2845
- [55] LIU, H.-Y. ; LI, X. ; GU, B. ; MAI, Y.-W. ; BAI, S.-L.: Fatigue performance of z-pin reinforced delamination. In: *17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, Schottland, 2009
- [56] YAN, W. ; LIU, H.-Y. ; MAI, Y.-W.: Numerical study of the mode I delamination toughness of z-pinned laminates. In: *Composites Science and Technology* 63 (2003), S. 1481–1493
- [57] RANATUNGA, V. ; CLAY, S. B.: Cohesive modeling of damage growth in z-pinned laminates under mode-I loading. In: *Journal of Composite Materials* 47 (2012), S. 3269–3283
- [58] GRASSI, M. ; ZHANG, X.: Finite element analysis of mode I interlaminar delamination in z-fibre reinforced composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 63 (2003), S. 1815–1832

- [59] DANTULURI, V. ; MAITI, S. ; GEUBELLE, P. H. ; PETEL, R. ; KILIC, H.: Cohesive modeling of delamination in z-pin reinforced composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), S. 616–631
- [60] CARTIÉ, D. D. R. ; TROULIS, M. ; PARTRIDGE, I. K.: Delamination of z-pinned carbon fibre reinforced laminates. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), S. 855–861
- [61] BRUNNER, A. J. ; TERRASI, G. P. ; CARTIÉ, D. D. R.: Fatigue testing of z-pin reinforced carbon-fibre laminates. In: *12th International Conference on Fracture*. Ottawa, Kanada, 2009
- [62] BIANCHI, F. ; ZHANG, X.: Predicting mode-II delamination suppression in z-pinned laminates. In: *Composites Science and Technology* 72 (2012), S. 924–932
- [63] YAN, W. ; LIU, H.-Y. ; MAI, Y.-W.: Mode II delamination toughness of z-pinned laminates. In: *Composites Science and Technology* 64 (2004), S. 1937–1945
- [64] RUGG, K. L. ; COX, B. N. ; MASSABO, R.: Mixed mode delamination of polymer composite laminates reinforced through the thickness by z-fibers. In: *Composites Part A* 33 (2002), S. 177–190
- [65] PEGORIN, F. ; PINGKARAWAT, K. ; MOURITZ, A. P.: Mixed-mode I/II delamination fatigue strengthening of polymer composites using z-pins. In: *Composite Part B* 123 (2017), S. 219–226
- [66] IRWIN, G. R.: Analysis of stresses and strains near the end of the crack. In: *Journal of Applied Mechanics* 24 (1957), S. 361–364
- [67] STRINGER, L. G. ; HILEY, M. J.: Through-thickness reinforcement of composites: z-pinning, stitching and 3-D weaving. In: *14th International Conference on Composite Materials*. San Diego, USA, 2003
- [68] PARTRIDGE, I. K. ; CARTIÉ, D. D. R. ; TROULIS, M. ; GRASSI, M. ; ZHANG, X.: Evaluating the mechanical effectiveness of z-pinning. In: *SAMPE Technical Conference*. Long Beach, USA, 2004



- [69] TROULIS, M. ; CARTIÉ, D. D. R. ; BARTATTONI, L. ; PARTRIDGE, I. K.: Z-pinned woven laminates: Interlaminar fracture results and pinning quality considerations. In: *6th International Conference on Deformation and Fracture of Composites*. Manchester, England, 2001
- [70] REZAI, A. ; CARTIÉ, D. D. R. ; PARTRIDGE, I. K. ; IRVING, P. ; ASTON, T. ; NEGRE, P. ; LANGER, J.: Interlaminar damage resistance of z-fibre reinforced structural cfrp. In: *13th International Conference on Composite Materials*. Peking, China, 2001
- [71] PEGORIN, F. ; PINGKARAWAT, K. ; MOURITZ, A. P.: Comparative study of the mode I and mode II delamination fatigue properties of z-pinned aircraft composites. In: *Materials and Design* 65 (2015), S. 139–146
- [72] KNAUPP, M. ; BAUDACH, F. ; FRANCK, J. ; SCHARR, G.: Impact and post-impact properties of cfrp laminates reinforced with rectangular z-pins. In: *Composites Science and Technology* 87 (2013), S. 218–223
- [73] ZHANG, X. ; HOUNSLOW, L. ; GRASSI, M.: Improvement of low-velocity impact and compression-after-impact performance by z-fibre pinning. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), S. 2785–2794
- [74] ISA, M. D. ; FEIH, S. ; MOURITZ, A. P.: Compression fatigue properties of z-pinned quasi-isotropic carbon/epoxy laminate with barely visible impact damage. In: *Composite Structures* 93 (2011), S. 2269–2276
- [75] MOURITZ, A. P.: Tensile fatigue properties of 3D composites with through-thickness reinforcement. In: *Composites Science and Technology* 68 (2008), S. 2503–2510
- [76] IBNABDELJALIL, I.: Strength and reliability of fiber-reinforced composites: Localized load-sharing and associated size effects. In: *International Journal of Solids and Structures* 34 (1997), S. 2649–2468
- [77] PARTDRIDGE, I. K. ; CARTIÉ, D. D. R. ; BONNINGTON, T.: Manufacture and performance of z-pinned composites. In: SHONAIKE, G. (Hrsg.) ; ADVANI, S. (Hrsg.): *Advanced polymeric composites*. CRC Press, 2003, S. 103–139

- [78] LI, C. ; YAN, Y. ; WANG, P. ; QI, D. ; WEN, Y.: Study on compressive properties of z-pinned laminates in RTD and hygrothermal environment. In: *Chinese Journal of Aeronautics* 25 (2012), S. 64–70
- [79] GRASSI, M. ; ZHANG, X. ; MEO, M.: Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates. In: *Composites Part A* 33 (2002), S. 1653–1664
- [80] BLACKLOCK, M. ; JOOSTEN, A. W. ; PINGKARAWAT, K. ; MOURITZ, A. P.: Prediction of mode I delamination resistance of z-pinned laminates using the embedded finite element technique. In: *Composites Part A* 91 (2016), S. 283–291
- [81] MOHAMED, G. ; ALLEGRI, G. ; YASAEI, M. ; HALLETT, S. R.: Cohesive element formulation for z-pin delamination bridging in fibre reinforced laminates. In: *International Journal of Solids and Structures* 132–133 (2018), S. 232–244
- [82] BIANCHI, F. ; ZHANG, X.: A cohesive zone model for predicting delamination suppression in z-pinned laminates. In: *Composites Science and Technology* 71 (2011), S. 1898–1907
- [83] CUI, H. ; KOUSSIOS, S. ; LI, Y. ; BEUKERS, A.: A mixed mode cohesive law for z-pinned composite delamination. In: *Computational Materials Science* 75 (2013), S. 60–68
- [84] MAY, M.: Numerical evaluation of cohesive zone models for modeling impact induced delamination in composite materials. In: *Composite Structures* 133 (2015), S. 16–21
- [85] HUANG, H. J. ; WAAS, A. M.: Modeling and predicting the compression strength limiting mechanisms in z-pinned textile composites. In: *Composites Part B* 40 (2009), S. 530–539
- [86] DICKINSON, L. C. ; FARLEY, G. L. ; HINDERS, M. K.: Prediction of effective three-dimensional elastic constants of translaminar reinforced composites. In: *Journal of Composite Materials* 33 (1999), S. 1002–1029
- [87] CUI, H. ; LI, Y. ; KOUSSIOS, S. ; ZU, L. ; BEUKERS, A.: Bridging micromechanisms of z-pin in mixed mode delamination. In: *Composites Structures* 93 (2011), S. 2685–2695

- [88] MEO, M. ; ARCHARD, F. ; GRASSI, M.: Finite element modelling of bridging micromechanics in through-thickness reinforced composite laminates. In: *Composite Structures* 71 (2005), S. 383–387
- [89] ZHANG, B. ; ALLEGRI, G. ; HALLETT, S. R.: High-fidelity fe modelling of z-pins in quasi-isotropic laminates. In: *16th European Conference on Composite Materials*. Sevilla, Spanien, 2014
- [90] HARPER, P. W. ; HALLETT, S. R.: Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination. In: *Engineering Fracture Mechanics* 575 (2008), S. 4774–4792
- [91] MCBEATH, S.: Safety Pins. In: *Racecar Engineering* 12 (2002), S. 56–62
- [92] CHANG, P. ; MOURITZ, A. P. ; COX, B. N.: Fracture and fatigue properties of z-pinned composite lap joints. In: *11th International Conference on Fracture*. Turin, Italien, 2005
- [93] ALLEGRI, G. ; ZHANG, X.: On the delamination and debond suppression in structural joints by z-fibre pinning. In: *Composites Part A* 38 (2007), S. 1107–1115
- [94] GRASSI, M. ; COX, B. ; ZHANG, X.: Simulation of pin-reinforced single-lap composite joints. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), S. 1623–1638
- [95] KOH, T. M. ; ISA, M. D. ; CHANG, P. ; MOURITZ, A. P.: Improving the structural properties and damage tolerance of bonded composite joints using z-pins. In: *Journal of Composite Materials* 46 (2012), S. 3255–3265
- [96] CHANG, P. ; MOURITZ, A. P. ; COX, B. N.: Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), S. 2163–2176
- [97] HEXCEL COMPOSITES: *Datenblatt Hexply M21*. URL:[https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/HexPly\\_M21\\_global\\_DataSheet.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_M21_global_DataSheet.pdf), Zugriff am 10.09.2018

- [98] ISO 15024:2001-12: *Fibre-reinforced plastic composites – Determination of mode I interlaminar fracture toughness,  $G_{IC}$ , for unidirectionally reinforced materials*. ISO 15024:2001(E)
- [99] DIN EN 6034:2016-02: *Prüfverfahren – Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrates, Mode II –  $G_{IIC}$* . EN 6034:2015
- [100] EN ISO 527-4:1997-07: *Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*. EN ISO 527-4:1997
- [101] DIN EN ISO 14126:2000-12: *Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene*. EN ISO 14126:1999
- [102] COX, B. N.: Snubbing effects in the pullout of a fibrous rod from a laminate. In: *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 12 (2005), S. 85–98
- [103] PARTRIDGE, I. K. ; CARTIÉ, D. D. R.: Delamination resistant laminates by z-fiber pinning: Part I manufacture and fracture performance. In: *Composites Part A* 36 (2005), S. 55–64
- [104] WARZOK, F. ; ALLEGRI, G. ; HALLETT, S. R.: Experimental characterisation of fatigue damage in single z-pins. In: *Composites Part A* 91 (2016), S. 461–471
- [105] PINHO, S. T. ; GUTKIN, R. ; PIMENTA, S. ; CARVALHO, N. V. ; ROBINSON, P.: Fibre-dominated compressive failure in polymer matrix composites. In: ROBINSON, P. (Hrsg.) ; GREENHALG, E. (Hrsg.) ; PINHO, S. (Hrsg.): *Failure mechanisms in polymer matrix composites*. Woodhead Publishing, 2012, S. 183–278